

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Katedra automatizační techniky a řízení

Řízení modelu polohovacího stolu pro ultrazvukové
svařování automobilových dveří
Control of positioning table model for ultrasonic welding
of the car doors

Student:

Bc. Maksim Kliuchnikau

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jaromír Škuta, Ph.D.

Ostrava 2019/2020

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 10.05.2020


.....

Maksim Kliuchnikau

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ сже́днано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 10.05.2020


.....


Maksim Kliuchnikau

Adresa trvalého pobytu autora práce: Lopuchová 79/20, Ostrava-Antošovice, 711 00

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jaromíru Škutovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a připomínek, které mi byly velkým přínosem při řešení diplomové práce.

V Ostravě: 10.05.2020


.....
Maksim Kliuchnikau

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Maksim Kliuchnikau

Studijní program:

N0714A270003 Mechatronika

Téma:

Řízení modelu polohovacího stolu pro ultrazvukové svařování
automobilových dveří
Control of Positioning Table Model for Ultrasonic Welding of the Car
Doors

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s technickými prostředky pro ultrazvukové svařování, popište tuto technologii.
2. Navrhněte model polohovacího stolu pro ultrazvukové svařování automobilových dveří včetně řídicího a monitorovacího systému.
3. Dle předcházejícího návrhu realizujte model včetně implementace řídicích algoritmů.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte směr dalšího řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:


- BALÁTEĚ, J., 2003. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN, 2003, 654 s. ISBN 80-7300-020-2.
- JANEČEK, J. 1993. *Distribuované systémy*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1993.
- NOVÁK, P., 2005. *Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení*. Praha: vydavatelství BEN, 2005. 248 s. ISBN 80-7300-141-1.
- SCHMID, D. a kol., 2005. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. Praha: Europa-SOBOTÁLES cz. 2005 ISBN 80-86706-10-9.
- VLACH, J., 1999. *Řízení a vizualizace technologických procesů*. PRAHA: BEN, 1999, 160 S. ISBN 80-86056-66-X.
- XIAO, P., 2018. *Designing Embedded Systems and the Internet of Things (IoT) with the ARM mbed, 1st Edition*. Wiley, 2018. 344p. ISBN 9781119364016.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

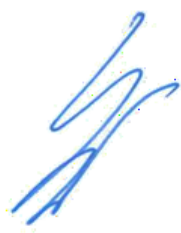
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jaromír Škuta, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

ANOTACE

KLIUCHNIKAU, Maksim. *Řízení modelu polohovacího stolu pro ultrazvukové svařování automobilových dveří: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení, 2020, 70 s. Vedoucí práce: Škuta, J.

Cílem tohoto projektu je provést výzkum v oblastech průmyslových výrobních procesů, návrhu modelu strojů a návrhu jeho řízení. Prvním úkolem je seznámení s problematikou procesu ultrazvukového svařování a zařízením, schopném umožnit takový proces. Následující část zabývá se rozбором programu SOLIDWORKS, umožňujícím vytvářet 3D modely a sestavy, provádět stresové zkoušky objektů, simulovat fungování modelu strojů, atd. Ve stejném čase budou probraný prostředky, vhodné pro řízení akčních prvků zdrojů v podobě krokových motorů. Následující část práce je návrh modelu polohovacího stolu pro ultrazvukové svařování. Cílem je vytvořit virtuální model reálných rozměrů, a zmenšený reálný. Virtuální model bude sloužit začátkem pro stvoření reálného průmyslového stroje, reálný - pro vyzkoušení regulačních procesů. Poslední část posuzuje výsledky a navrhuje směr dalšího řešení projektu.

ANNOTATION

KLIUCHNIKAU, Maksim. *Control of positioning table model for ultrasonic welding of the car doors: Master Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of mechanical engineering, Department of Control Systems and Instrumentation, 2020, 70 p. Thesis head: Škuta, J.

The aim of this project is to perform research in the areas of industrial production processes, design of a machine model and suggestion of its control. The first task is to get acquainted with the issues of the ultrasonic welding process and a device capable of enabling such a process. The following part deals with the analysis of the SOLIDWORKS program, allowing to create 3D models and assemblies, to perform stress tests of objects, to simulate the functioning of the machine model, etc. The following part of the thesis is a design of a positioning table model for ultrasonic welding. The goal is to create a virtual model of real dimensions, and a scaled real one. The virtual model will serve as the beginning for the creation of an industrial machine, the real one - to test control processes. The last part assesses the results and suggests the direction of further project solution.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Technologie ultrazvukového svařování	12
2.1	Ultrazvuk.....	12
2.2	Druhy ultrazvukových vln.....	14
2.3	Intenzita a výkon ultrazvuku.....	15
2.4	Útlum ultrazvuku.....	16
2.5	Odraz ultrazvuku od rozhraní mezi materiály.....	17
2.6	Ultrazvukové zářiče.....	18
2.7	Použití ultrazvuku	19
2.8	Popis procesu ultrazvukového svařování	20
3	Seznámení s prostředím SOLIDWORKS.....	23
3.1	Terminologie systému	24
3.2	Postup práce v SOLIDWORKS	26
3.3	Pracovní prostředí SOLIDWORKS	27
4	Technické prostředky pro řízení	29
5	Koncepční model průmyslového stroje	31
6	Návrh laboratorního modelu	34
6.1	Rešerše pro výběr komponent.....	34
6.2	Mechanická část modelu	38
6.3	Volba pohonné části systémů.....	42
6.4	Výběr řídicích prvků	45
7	Montáž modelu	48
8	Realizace, komunikace a konfigurace řídicího systému	49
9	Ovládání a monitorování systému	56
9.1	GRBL firmware a G-kód.....	56
9.2	GUI aplikace pro ovládání stolu.....	60
9.3	Kalibrace modelu	63
10	Návrh sonotrody pro US	65
11	Závěr	67
12	Seznam použité literatury	69

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AC	alternating current – střídavý proud
CAD	computer-aided design – počítačem podporovaný design
CNC	computer numeric control – číslicové řízení počítačem
DC	direct current – stejnosměrný proud
GRBL	firmware pro ovládání CNC strojů
GUI	graphical user interface – grafické uživatelské rozhraní
PD&D	product design and development – design a vývoj produkce
PLA	plast Polylaktid (kyselina polymléčná)
PWM	pulse width modulation – pulzně šířková modulace
US	ultrasonic welding – ultrazvukové svařování
USB	universal serial bus – univerzální sériová sběrnice
2D	dvourozměrný
3D	třírozměrný
c	rychlost šíření zvuku
c_l	rychlost zvuku pro podélné vlny
c_t	rychlost zvuku pro příčné vlny
D	průměr kruhového akustického převodníku
D_{ak}	součinitel prostupu akustického tlaku přes rozhraní dvou materiálů
d_L	průměr hřídele pro ložisko
d_n	průměr trapézového šroubu
d_s	střední průměr trapézového šroubu
E	modul pružnosti
F_A	síla axiální
F_{km}	nastavené mikrokrokování
F_{TV}	třecí síla v kluzném vedení
F_x	zatížení tyče od nesených komponentů

f	frekvence
f_1	součinitel tření ve vodicích plochách
f_2	součinitel tření na šroubu
f_3	součinitel tření na poloměr čepu
G	modul smyku
g	tíhové zrychlení
I	kvadratický moment průřezu
I_{Max}	maximální proud
i	převod (pro přímý pohon)
L_X	délka tyče
λ	vlnová délka; úhel stoupání
M_F	moment při redukci sil na hřídel motoru
M_G	moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot
M_{GT}	moment od tíhové složky působící při skloněném vedení
M_{KSM}	moment zátěže od předeprnutí šroubu
M_L	moment zátěže od třecích sil v ložisku
M_m	potřebný moment motoru pro pohanění polohovacího systému
M_{zrnhm}	moment zátěže redukovaný na hřídel motoru
m_t	hmotnost tyče
μ	Poissonova konstanta
N	délka bližní zóny ultrazvukového zářiče
$N_{řm}$	počet zubů na řemenici
η_L	účinnost ložisek
η_p	účinnost převodu
η_s	účinnost šroubu
$P_{ř}$	rozteč mezi zuby řemene
$P_{š}$	rozteč šroubů
p	amplituda akustického tlaku

ρ	hustota
q_x	zatížení vlastní tíhou tyče
R	součinitel odrazu akustického tlaku od rozhraní dvou materiálů
S_{km}	počet kroků na otáčku motoru
s	stoupání šroubu
T	perioda
T_p	přesnost pohybu
V_{Ref}	referenční napětí
v	amplituda vibrační rychlosti částic
W_{Dov}	dovolený průhyb tyče
W_x	celkový průhyb ocelové tyče
W_{xF}	průhyb tyče od nesených komponentů
W_{xq}	průhyb od vlastní tíhy tyče
Z	akustická impedance

1 Úvod

Dnes se v našem vysoce integrovaném světě potřeby zákazníků mění velmi rychle. Taková skutečnost dělá čas jedním z nejdůležitějších faktorů při navrhování a vývoji produktů. Také to vyvolává konkurenci mezi různými firmami ve výrobě nových přístrojů, které musí mít nejlepší vlastnosti a schopnosti. Tím pádem většina zákazníků bude kupovat zboží od té vynikající firmy, která zaručuje nejlepší kvalitu, originalitu a pohodlí při používání jejich produkce.

Design a výroba jsou však velmi náročné a komplikované procesy. Například před několika desítkami let bylo třeba plýtvat spoustou látek a časem pro fyzické experimenty a testy připravovaného stroje, aby se pochopilo, jak bude vypadat a fungovat. Naštěstí neustálý vývoj, výzkum a řešení v oblastech průmyslu a výroby zboží dosáhli dostatečné dokonalého úrovně. Moderní technologie dovolují konstruktérům a výrobcům urychlit proces designu prototypů a vytvářet více a více moderních a složitých zařízení.

Po přidání ovládací části a následné automatizaci stroje můžou fungovat samočinně. Toto vede k vyloučení monotónních procesů z výrobních smyček a ponechává člověku jenom takovéto úkoly jako přidávání surovin na vstup, sběr zboží na výstupu a periodický servis výrobních linek dle potřeby. Ve výsledku máme továrny s urychlenou dobou zpracování časově obtížných postupů, které produkují stovky tisíc výrobků denně, můžou fungovat sedm dní v týdnu a potřebují zásah člověka jenom při poruchách a výjimečných obtížích.

Spolu s tím vznik virtuální reality dovolil modelování objektů a mechanismů v jejich reálném měřítku a včetně jejich vlastností, zkoumat jevy a provádět simulaci fyzických dějů. Pro výrobu a průmysl je to další velkou výhodou. Už neexistuje potřeba vytvářet reálné prototypy budoucích výrobků z levných plastů nebo dřeva. Jednoduše namodelujeme objekt v příslušných programech, přiřadíme mu jeho vlastností a dále můžeme zkoumat jeho chování při provozních vlivech a podmínkách.

Spojení všech těchto oblastí se nazývá Mechatronika, a člověk, který dokáže operovat a pracovat v každé z nich, může se počítat jako jeden z nejvýznamnějších průmyslových expertů.

2 Technologie ultrazvukového svařování

„Stroje a zařízení se sestavují z různých částí s vymezenou funkcí, které se mezi sebou vhodným způsobem spojují. Spojením 2 nebo více součástí v jediný celek se dosahuje: nastavení a zajištění jejich vzájemné polohy, zachycení nebo přenos provozních sil a pohybu“. V průmyslu existuje několik různých typů spojovacích procesů, které můžeme třídit podle různých kritérií. „Provedení jednotlivých spojů a jejich částí mohou být velmi různá. Spojení může být rozebíratelné nebo nerozebíratelné, pohyblivé nebo nepohyblivé, s použitím přídavného materiálu, spojovacích částí nebo tvarováním spojovaných částí, realizované pružnou deformací jedné nebo obou spojovaných částí nebo s předpětím“ [1].

Když začneme popisovat nerozebíratelné spoje, nejdůležitějšími parametry tady jsou: pevnost, tuhost, spolehlivost a životnost. Kromě těchto nároků se klade další počet různých požadavků, jako jsou bezpečnost, odolnost vnějším vlivům, přesnost, vzhled, atd. Jakým způsobem spojíme dva různé objekty v celek a nezanedbáme každý z těchto parametrů? Nejznámější metodou pro nerozebíratelné spojování je svařování. V současné době existuje spousta různých variant tohoto procesu: obloukové, plamenové, elektronové, svařování atomárním vodíkem, svařování třením, svařování výbuchem, atd.

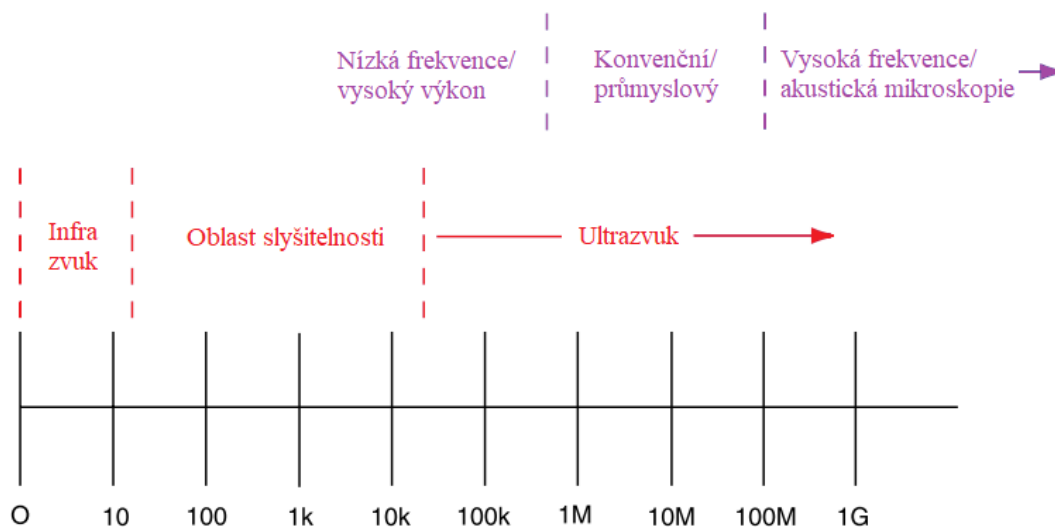
Jednou z moderních postupů je ultrazvukové svařování (dále jenom US). Dovoluje svařovat odlišné materiály a je jedním z nejrychlejších. Ve stejném čase US je ekologický šetrná metoda vzhledem k tomu, že nepotřebuje přídavné materiály, ochranné plyny, zvyšování teploty látek až nad teplotu tání, a hromadu dalších výhod. Hodně firem využívá US už několik let a pro některá řešení zaměnilo starší metody úplně.

Na začátku ale musíme provést rozbor fyzické podstaty ultrazvuku, což jsou následující kapitoly.

2.1 Ultrazvuk

Mechanické vibrace, umístěné nad frekvenčním pásmem, které lidské ucho schopno slyšet (obvykle do 20 kHz), se nazývají **ultrazvuk**. Ultrazvukové vibrace se pohybují ve formě vlny, jako šíření světla. Na rozdíl od světelných vln, které se mohou šířit ve vakuu, ultrazvuk vyžaduje elastické médium, jako jsou plyn, kapalina nebo pevná látka.

Akustické spektrum zvuku je rozděleno na 3 frekvencí pásma: infrazvuk, pásmo slyšitelnosti a ultrazvuk. Ultrazvukové pásmo je poté rozděleno na další 3 sekce [2].



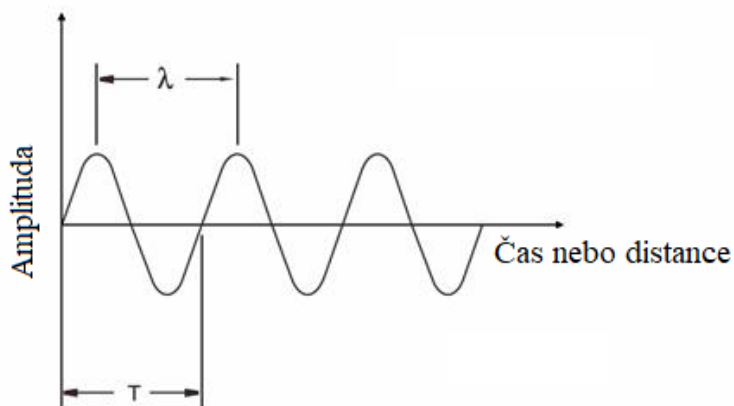
Obr. 1 Zvukové spektrum [2]

Hlavními parametry vlny jsou **vlnová délka** a **perioda**. Počet cyklů dokončených za jednu sekundu se nazývá **frekvence** a měří se v Hertzech (Hz). Čas potřebný k dokončení celého cyklu se nazývá **perioda** a měří se v sekundách. Vztah mezi frekvencí a periodou vlny je uveden ve vzorci:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

kde f – frekvence (Hz),

T – perioda (s).



Obr. 2 Hlavní parametry ultrazvukové vlny [5]

Rychlost zvuku v ideálním elastickém materiálu při dané teplotě a tlaku je konstantní. Vztah mezi ultrazvukovou rychlostí a vlnovou délkou je následující:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

kde λ – délka vlny (m),

c – rychlost šíření zvuku (m/s).

V pevných látkách pro podélné vlny rychlost zvuku:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (3)$$

kde c_l – rychlost zvuku pro podélné vlny (m/s),

E – modul pružnosti (Pa),

μ – Poissonova konstanta,

ρ – hustota (kg/m³).

U příčných vln je určena vzorcem:

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4)$$

kde c_t – rychlost zvuku pro příčné vlny (m/s),

G – modul smyku (Pa).

Zvuková disperze – je závislost fázové rychlosti monochromatických zvukových vln na jejich frekvenci ω . Disperze rychlosti zvuku může být způsobena fyzikálními vlastnostmi média, přítomností v něm cizích nečistot a také hranicemi těla, ve kterém se šíří zvuková vlna.

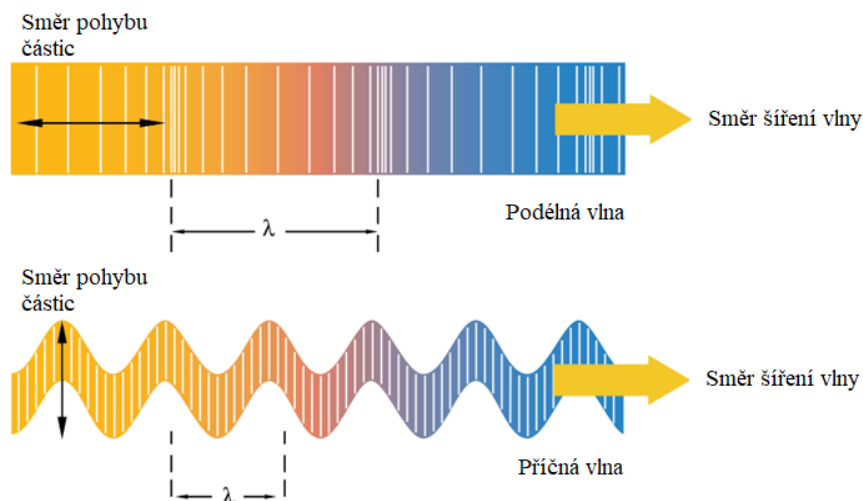
2.2 Druhy ultrazvukových vln

Většina metod ultrazvukového výzkumu používá buď podélné, nebo příčné vlny. Existují také další formy šíření ultrazvuku jako povrchové vlny a vlny Lamba.

Podélné ultrazvukové vlny jsou vlny, jejichž směr šíření se shoduje se směrem pohybu a rychlostí částic média.

Příčné ultrazvukové vlny - vlny šířící se ve směru kolmém ke směru pohybu a rychlosti částic těla, stejně jako smykové vlny (viz obr. 3).

Povrchové ultrazvukové vlny mají eliptický pohyb částic a šíří se po povrchu materiálu. Jejich rychlost je přibližně 90% rychlosti šíření příčné vlny a jejich průnik dovnitř materiálu přibližně se rovna jedné vlnové délce [2].



Obr. 3 Pohyb částic v podélných a příčných ultrazvukových vlnách [2]

Vlna Lemba je elastická vlna šířící se v pevné vrstvě s volnými hranicemi, ve které dochází k vibračnímu posunu částic jak ve směru šíření vlny, tak i kolmo k rovině vrstvy. Vlny Lemba jsou jedním z typů normálních vln v elastickém vlnovodu - v desce s volnými hranicemi. Protože tyto vlny musí splňovat nejen rovnice teorie pružnosti, ale také okrajové podmínky na povrchu desky, jejich pohyb a vlastnosti jsou složitější než vlny v neohrazených pevných látkách [3].

2.3 Intenzita a výkon ultrazvuku

Intenzita zvuku (síla zvuku) — je průměrná energie, přenášená zvukovou vlnou přes jednotkovou oblast, kolmou ke směru šíření vlny za jednotku času. U periodického zvuku se průměrování provádí buď za časové období mnohem větší než perioda, nebo za nějaký počet period. Intenzita ultrazvuku je hodnota, která vyjadřuje výkon akustického pole v bodě [4].

Pro rovinnou sinusovou vlnu je intenzita ultrazvuku určena vzorcem:

$$I = \frac{pv}{2} = \frac{p^2}{2\rho c} = \frac{v^2 \rho c}{2} \quad (5)$$

kde p — amplituda akustického tlaku (Pa),

v — amplituda vibrační rychlosti částic (m/s),

ρ — hustota (kg/m³),

c — rychlost šíření zvuku (m/s).

Výkon zvuku — je energie přenášená zvukovou vlnou přes daný povrch za jednotku času. Obvykle se zkoumá okamžitá hodnota výkonu ultrazvuku, nebo průměr za period nebo větší dobu. Největší zájem je hodnota výkonu ultrazvuku průměrovaná na jednotku plochy, tzv. průměrný poměrný výkon nebo intenzita zvuku [5].

Tab. 1 - Vlastnosti některých běžných materiálů [6]

Materiál	Hustota (kg/m ³)	Rychlost podélné vlny (m/s)	Rychlost příčné vlny (m/s)	Akustická impedance (10 ³ kg/(m ² ·s))
Vzduch	0,1	330	-	0,00033
Voda	1000	1480	-	1,480
Sklo	3600	4260	2560	15,336
Hliník	2700	6320	3130	17,064
Mosaz	8100	4430	2120	35,883
Měď	8900	4700	2260	41,830
Níkl	8800	5630	2960	49,544
Ocel	7850	5940	3250	46,629
Titán	4540	6230	3180	26,284

2.4 Útlum ultrazvuku

Jednou z hlavních charakteristik ultrazvuku je jeho útlum. **Útlum ultrazvuku** je pokles amplitudy a spolu s tím i intenzity zvukové vlny při její šíření. K útlumu ultrazvuku dochází z mnoha důvodů. Mezi hlavní patří:

- 1) pokles amplitudy vlny s rostoucí vzdáleností od zdroje, určené tvarem a vlnovými rozměry zdroje;
- 2) rozptyl ultrazvuku způsobený nehomogenním složením média, v důsledku čehož klesá tok energie ve směru jeho šíření;
- 3) absorpce ultrazvuku, tj. nevratná transformace energie zvukové vlny do jiných forem, zejména v tepelnou energii.

První z těchto důvodů souvisí se skutečností, že při tom, jak se vlna šíří z bodu nebo sférického zdroje, energie, vyzařovaná tímto zdrojem, je distribuována na stále se zvyšující vlnovou frontu, a v důsledku toho se tok energie skrz povrchovou jednotku snižuje (intenzita zvuku klesá).

K rozptylu ultrazvuku dochází kvůli ostré změně vlastností média - jeho hustoty a elastických modulů na hranici nehomogenit, jejichž velikosti jsou srovnatelné s vlnovou délkou. V plynech to mohou být například kapky, ve vodném médiu - vzduchové bubliny, v pevných látkách - různé cizí inkluze nebo jednotlivé krystaly v polykrystalech, atd.

Absorpce ultrazvuku může být způsobena různými mechanismy. Velkou roli hraje viskozita a tepelná vodivost média, interakce vlny s různými molekulárními procesy látky, s tepelnými vibracemi krystalové mřížky, atd. [5].

2.5 Odraz ultrazvuku od rozhraní mezi materiály

Když zvuková vlna dopadne na rozhraní mezi materiály, část energie se odrazí a zůstane v prvním médiu, zbytek energie projde do druhého média. Poměr mezi odraženou energií a energií procházející do druhého média je určen vlnovými impedancemi prvního a druhého média. Při absenci disperze rychlosti zvuku je vlnová impedance nezávislá na tvaru vlny a je vyjádřena vzorcem:

$$Z = \rho c \quad (6)$$

kde Z – akustická impedance ($\frac{kg}{m^2s}$),

ρ – hustota (kg/m^3),

c – rychlost šíření zvuku (m/s).

Koeficienty odrazu a průchodu budou stanoveny následovně:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (7)$$

kde R – součinitel odrazu akustického tlaku,

Z_1 – vlnová impedance první látky, ve které se šíří zvuková vlna ($\frac{kg}{m^2s}$),

Z_2 – vlnová impedance druhé látky, do které zvuková vlna přechází ($\frac{kg}{m^2s}$),

$$D_{ak} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (8)$$

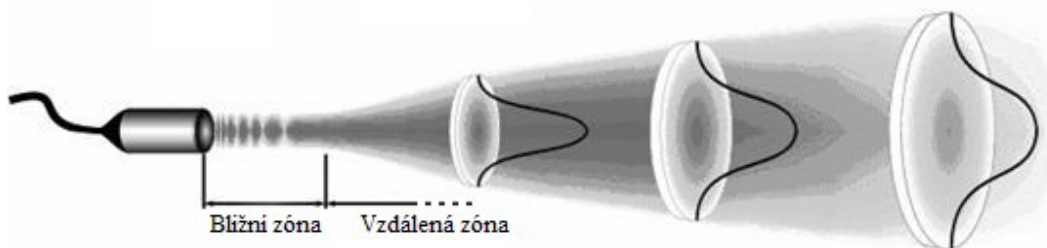
kde D – součinitel prostupu akustického tlaku.

Je také třeba poznamenat, že pokud je druhé médium akusticky „měkčí“, tj. $Z_1 > Z_2$, po odrazu se fáze vlny změní o 180° [4].

2.6 Ultrazvukové zářiče

Ultrazvukové zářiče – jsou zařízení, používaná k podnícení ultrazvukových vibrací a vln v plynových, kapalných a pevných médiích. Ultrazvukové vysílače přeměňují nějaký určitý druh energie na energii zvukového pole. Nejrozšířenějšími vysílači ultrazvuku jsou *elektroakustické převodníky*. U převážné většiny ultrazvukových zářičů tohoto typu, jmenovitě u *piezoelektrických převodníků*, *magnetostrikčních snímačů*, *elektrodynamických zářičů*, *elektromagnetických* a *elektrostatických zářičů* je elektrická energie přeměněna na vibrační energii pevného tělesa (radiální desky, tyče, bránice atd.), které vydává akustické vlny do prostředí. Všechny tyto převaděče jsou lineární, pouze při velmi velkých amplitudách kmitů poblíž horní hranice dynamického rozsahu může dojít k nelineárním zkreslením. Mezi hlavními vlastnostmi ultrazvukových zářičů (elektroakustických převodníků) patří *citlivost*, *elektroakustická účinnost* a *vnitřní elektrická impedance*.

Zvukové pole převodníku je rozděleno do dvou zón: bližní a vzdálené. **Bližní zóna** je oblast přímo před převodníkem, kde amplituda ozvěny prochází řadou výšek a minim. Bližní zóna končí na posledním maximu, které je umístěno ve vzdálenosti N od převodníku. Je známo, že umístění posledního maxima je přirozeným fokusem převodníku. **Vzdálená zóna** je oblast za N , kde tlak zvukového pole postupně klesá na nulu [4].



Obr. 4 Zvukové pole kruhového zářiče [4]

Pozice posledního maxima N na akustické ose závisí na průměru a vlnové délce a pro kruhový převodník je vyjádřena vzorcem:

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (9)$$

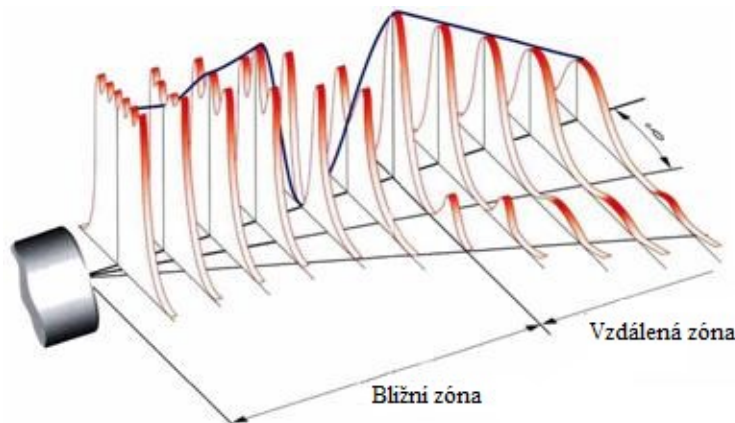
kde N – délka bližní zóny (m),

D – průměr převodníku (m),

λ – délka vlny (m).

Vzhledem k tomu, že D je obvykle mnohem větší než λ , může být rovnice zjednodušena takto:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (10)$$



Obr. 5 Bližní a vzdálená zóny kruhového zářiče [5]

Vlastnosti zvukového pole jsou určeny konstrukcí ultrazvukového převodníku. Proto na jeho tvaru závisí šíření zvuku v pracovní oblasti a citlivost senzoru.

2.7 Použití ultrazvuku

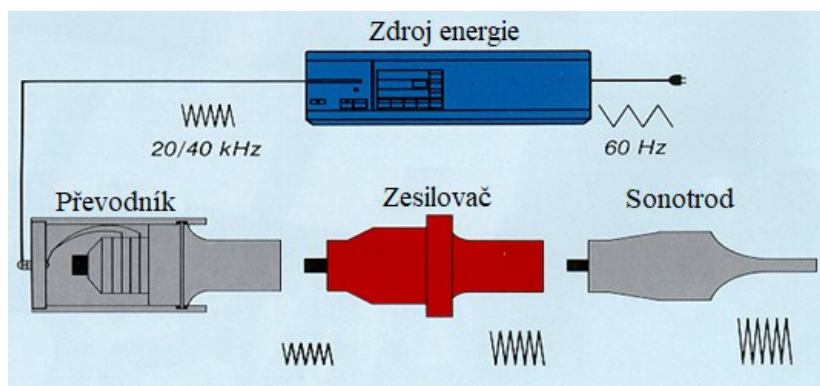
Rozmanité aplikace ultrazvuku, ve kterých se používají jeho různé vlastnosti, lze podmíněně rozdělit do tří směrů. První je spojen se získáváním informací pomocí ultrazvukových vln, druhý - s aktivním vlivem na látku, třetí - se zpracováním a přenosem signálů (směry jsou uvedeny v pořadí jejich historického utváření). Pro každou konkrétní aplikaci se používá ultrazvuk v určitém frekvenčním rozsahu [5].

Níže jsou přivedeny některé oblasti, ve kterých ultrazvukové technologie jsou úspěšně použity:

- konstrukce zařízení/ strojůrenství,
- audio a video zařízení,
- automobilový průmysl,
- elektrotechnika,
- elektrické spotřebiče pro domácnost,
- lékařské vybavení,
- textilní průmysl,
- potravinářský průmysl,
- dětské hračky,
- průmyslové obalování, atd.

2.8 Popis procesu ultrazvukového svařování

Technologie ultrazvukového svařování je založena na zavedení mechanických vibrací ultrazvukové frekvence do zóny kontaktu spojených součástek, kde postupně prochází jejich zahřívání (bez vnějšího přívodu tepla), roztavení a následně plastifikace za současného působení tlaku. Zahřívání ve spojovací zóně během svařování nastává v důsledku absorpce energie z mechanických vibrací, mezního tření spojovaných povrchů a odrazů vibrací. Ultrazvuková frekvence je od 20 do ≈ 100 kHz. Většinou se používají tři hlavní provozní frekvence: 20, 35 a 70 kHz. Vyrábí se také generátory s dodatečnými provozními kmitočty 30 a 40 kHz.



Obr. 6 Základ ultrazvukové technologie

Stroj se skládá s těchto základních uzlů (viz obr. 6):

- 1) Ultrazvukový zdroj energie generuje střídavý elektrický signál s ladicí frekvencí 20 až 40 kHz;
- 2) Převodník převádí elektrickou energii na mechanické vibrace pomocí 4 až 6 piezokeramických disků (například elektrický signál 930 V a 20 kHz se převede na mechanickou vibraci 20 mikronů);
- 3) Zesilovač zvyšuje amplitudu generované vibraci;
- 4) Sonotrod (viz obr. 7) přenáší vysokofrekvenční mechanickou energii do svařovaných součástek.



Obr. 7 Různé druhy sonotrodů [2]

Svařovací postup: horní nástavec (vlnovod, sonotroda) se pohybuje pod tlakem pneumatického válce dolů a dotýká se svařované součásti. Samotná část (dvě poloviny) leží ve spodní podpěře. Po dotyku se zapne ultrazvukový generátor: na součást působí tlak (síla) a amplituda vibrací vlnovodu. Pod vlivem těchto dvou faktorů se plast roztaví a dochází k ponoru horní poloviny vzhledem k dolní. Hlavními znaky ukončení procesu jsou čas, cesta (hloubka ponoru) a energie. Podmínky zastavení se nazývají režimy svařování: v čase, v energii, v čase a energii, atd.

Abychom lépe porozuměli princip činnosti, můžeme provést analogii mezi ultrazvukovým svařováním a autem. Převodník provádí přeměnu energie (jako motor), akustický zesilovač upravuje koeficient mezi výkonem a rychlostí (jako převodovka) a nakonec vlnovod usměřňuje a aplikuje tuto energii k provedení požadované práce (jako kola).

Všechny části mechanického systému automobilu by měly být dobře navrženy a harmonizovány, aby se maximalizovala účinnost přenosu energie. Totéž se děje s ultrazvukovými systémy, v tomto případě je však klíčovým parametrem účinnosti je frekvence všech složek, která by měla odpovídat určité hodnotě co nejblíže, například $20 \text{ kHz} \pm 50 \text{ Hz}$.

Existují ruční a stacionární provedení ultrazvukového mechanismu (viz obr. 8).



Obr. 8 Ruční (zleva) a stacionární (zprava) US stroje

Hlavním prvkem ultrazvukového přístroje je akustický uzel. Střídavý proud ultrazvukové frekvence z generátoru je přiváděn do piezoelektrického převodníku (převodník, zvuková hlava). Mechanické vibrace stejné frekvence, které v ní vznikají, jsou přenášeny do zesilovače (amplitudový zesilovač) a poté do vlnovodu (sonotroda) a částí, které jsou s ním v kontaktu. V tomto případě generátor, ultrazvukový konvertor, zesilovač a vlnovod pracují v rezonanci. Upevnění akustické jednotky k montážnímu tělesu se provádí v místě, kde je amplituda kmitů rovna nule (uzel vibrací).

Výhody US:

- nízké náklady na vybavení a jeho údržbu (rentabilita);
- velmi krátký svařovací cyklus (1 - 4 sec) včetně tavení a tuhnutí plastu. To znamená, že produkt je schopen vydržet zatížení a být transportován k dalšímu zpracování ihned po svařování;
- nízká spotřeba energie ve srovnání s jinými technologiemi (maximální výkon generátoru je 3 kW, někdy dosahuje 5 kW);
- vysoká opakovatelnost od produktu k produktu;
- ultrazvuk funguje bez znečištění, proto může být US doporučeno pro použití v čistých místnostech;
- nastává přímo se strukturami svařovaného materiálu, takže nejsou potřebné doplňkové látky, jako je lepidlo, rozpouštědlo, atd. To umožní automatizovat proces montáže a zvýšit produktivitu;
- účinnost moderních ultrazvukových svařovacích strojů dosahuje 95%.

Nevýhody US:

- hmotnost svařovacího stroje může dosahovat desítek kilogram;
- velikost výrobků při použití jednoho sonotrodu je maximálně $\approx 200 \times 200$ mm;
- pokud je produkt větší: svařování v několika krocích nebo vícepolohový ultrazvukový stroj (svařovací šev není spojitý, ale bodový);
- vyžaduje speciální návrh nástavců pro každou novou úlohu.

3 Seznámení s prostředím SOLIDWORKS

Před tím jak začít popisovat samotný SOLIDWORKS je nutno uvést co ten program vůbec představuje a k čemu slouží. SOLIDWORKS je hezkým příkladem CAD (Computer-aided design) systému.

CAD je software, který umožňuje vytvářet modely součástí a mechanismů na základě geometrických dat. Dříve 2D CAD byly jedinou možností pro vizualizace, ale pro prezentaci komplexního produktu nebyly příliš efektivní. Takže tento systémy byly rozšířeny na 3D CAD. 3D CAD umožňuje vytvořit reprezentaci skutečného objektu, který lze zobrazit z různých úhlů pohledu. Modelem může být jeden díl nebo sestava. Sestavy jsou pouze kombinací různých částí, které jsou vzájemně propojeny pomocí různých spojení nebo omezení.

První a hlavní výhodou používání CAD je krátké období vytváření modelu, bez použití fyzických materiálů. Pokud je potřebný prvotní prototyp produktu ve fázi plánování nebo vývoje koncepce, lze jej rychle navrhnout pomocí vhodných nástrojů CAD. Aby byl proces co nejrychlejší, rozhraní CAD nabízí mnoho metod. Zde nemusíme kreslit každou hranu nebo rovinu vytvořeného objektu. CAD zahrnuje takové nástroje, jako je vytlačování náčrtu obrysu z roviny, otáčení nějakého tvaru kolem centrální osy (to je velmi užitečné pro výrobu hřídelů), zrcadlení objektů pomocí referenční roviny (skvělé pro vytváření forem s dutinami), sražení nebo zaoblení úhlů, atd. Kromě toho lze kdykoli model otáčet, zvětšovat, dělit a některé části je možné změnit na „neviditelný“ režim, aby návrhář byl schopen pracovat v některých skrytých oblastech prototypů, které by měly mít dutý vlnitý tvar (například tvar v podobě mušle). Kromě toho CAD nabízí také nástroje pro vizuální úpravu. Toto umožňuje zvýraznit důležité části, roviny a hrany nebo vylepšit model, aby vypadal jako reálný. Zmíněné funkce pomáhají podrobně popisovat objekt a připravovat jej pro další zpracování nebo prezentaci.

Všechny CAD systémy jsou založeny na použití skutečných rozměrů a koeficientů. Zahrnuty jsou také informace o povaze materiálů (hmotnost, hustota, pevnost v tahu, pružnost, atd.). Před skicováním si může návrhář modelu vybrat preferované jednotky. To usnadní všechny další operace (např. montáž a testování). A zde se objevuje ještě jedna výhoda: CAD pomáhá při tvorbě technické dokumentace. Dokumentace je kriticky důležitá pro jakýkoli proces PD&D a zahrnuje všechny jeho fáze dohromady. Při používání CAD jsou všechna data o modelu uložena do souboru a lze je kdykoli použít. Dalším bodem je, že 3D model je možné odrazit na 2D rovině, aby se vytvořil návrhový výkres (například pro ilustraci sestavy).

Další výhodou CAD je to, že existuje mnoho datových knihoven a online katalogů. Není třeba kreslit nový model pokaždé znovu. Mnoho běžných forem a podsestav je možné najít online, stáhnout a použít. Obecně jsou tyto části základem pro tvorbu složitých mechanismů, a lze je snadno měnit, opravovat a spojovat mezi sebou. Navíc po vytvoření nové součásti ji mohou návrháři poslat do těchto offline úložišť nebo vytvořit offline knihovnu v počítači, která v budoucnu dovolí tuto součást používat (například pro zdokonalení produktové generaci nebo změnu platformy výrobku).

Také CAD systémy umožňují provádět virtuální analýzy a simulace procesů. To je další důležitá výhoda pro PD&D. Nabízí se celá řada testů. Zde najdeme stressové zkoušky jednotlivých částí, teplotní nebo průtokové analýzy, kinematické a dynamické simulace mechanismů a systémů, ve kterých můžeme nastavit čas, vzdálenost, zatížení a další druhy omezení. Všechny zkoušky mohou být udržovány s povolenou gravitací a třením mezi částmi. Výsledky jsou vždy zobrazeny jako grafy, tabulky parametrů, zátěžové sítě a další. Test může ukázat, jak bude produkt působit v situacích při extrémních podmínkách a pomůže zlepšit jeho vlastnosti a schopnosti. Virtuální simulace přinášejí snížení nákladů na použití fyzických zdrojů, pracovní síly a času výroby. Někdy jsou však některé systémy příliš komplikované, mají mnoho proměnných, podmínek a omezení. Protože CAD jsou systémy závislé na parametrech, jejich funkčnost je omezena na matematické operace, takže ne každou situaci lze testovat.

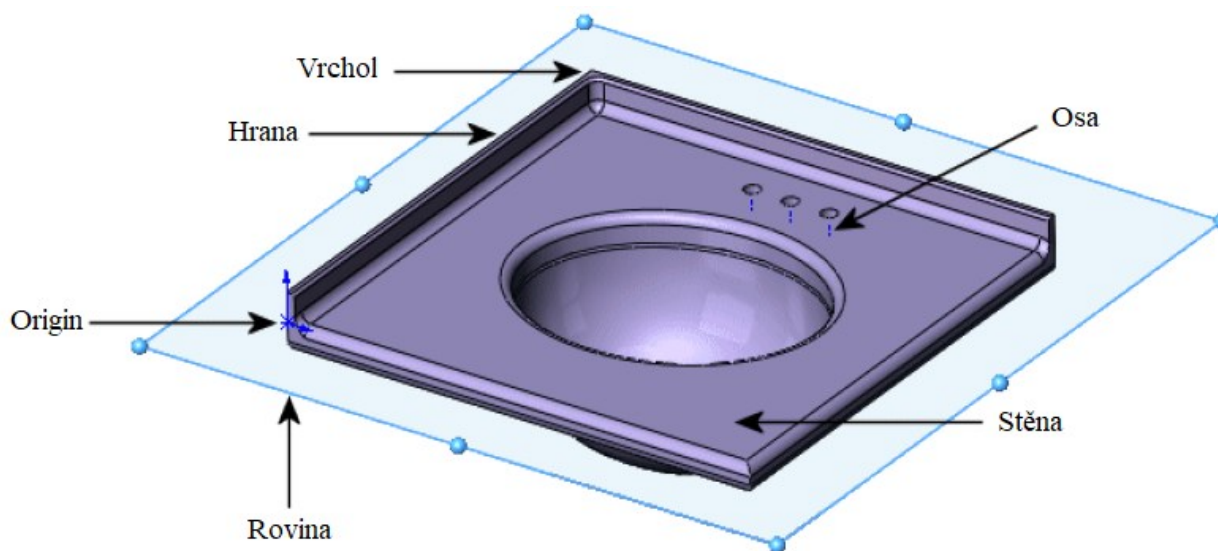
3.1 Terminologie systému

Před začátkem rozboru samotného prostředí a postupu tvorby objektů je důležité probrat terminologii systému. Existuje několik výrazů, které se objevují v softwaru a dokumentaci SOLIDWORKS:

Origin – je to původní bod systému, objeví se jako dvě modré šipky a představuje (0,0,0) souřadnici modelovacího prostoru a potom vytvořeného dílu. Když je skica aktivní, počátek skici se zobrazí červeně a představuje (0,0,0) souřadnici náčrtu. Můžete přidat rozměry a vztahy k původu modelu, ale ne k původu náčrtu.

Rovina – plochá konstrukční geometrie. Roviny můžeme použít pro 2D skicování, pro výhled modelu v řezu nebo přidat neutrální rovinu, která bude dále použita.

Osa – rovná čára použitá k vytváření geometrie modelu, jeho rys nebo šablony. Můžeme vytvořit osu různými způsoby, včetně protnutí dvou rovin. Aplikace SOLIDWORKS vytváří dočasné osy implicitně pro každý kónický nebo válcový profil v modelu.



Obr. 9 Základní terminologie SOLIDWORKS

Stěna – hranice, která pomáhá definovat tvar modelu nebo povrchu. Stěna je volitelná oblast (rovinná nebo nerovinná) modelu nebo povrchu. Například, krychle má šest stěn.

Hrana – místo, kde se protínají dvě nebo více stěn a jsou spojeny dohromady. Hrany například můžou být vybraný pro skicování a kótování.

Vrchol – bod, ve kterém se protínají dvě nebo více čar nebo hran. Vrcholy také můžou být vybraný pro skicování a kótování.

Díl – základní stavební prvek v softwaru SOLIDWORKS.

Sestava – kombinace několika dílu, spojených mezi sebou vazbami nebo pomocí ohraničení. Můžou obsahovat celky, nazývané podsestavy.

SOLIDWORKS umožňuje rychle a přesně navrhovat modely. Každý model sestává z 3D geometrie, která definuje jeho hrany, plochy a povrchy. Jednou z nejsilnějších funkcí aplikace je, že jakákoli změna, provedena v jednotlivé části, se projeví ve všech sdružených výkresech nebo sestavách. Navrhováním součástí z počáteční skici až do konečného výsledku dostaneme 3D objekt. Pomocí něho můžete vytvářet 2D výkresy nebo sestavy přidáním dalších částí nebo podsestav pro vytvoření 3D sestav. Také jde vytvořit 2D výkresy 3D sestav [8].

3.2 Postup práce v SOLIDWORKS

Pro vytváření nových modelu a součástek existuje určitý postup:

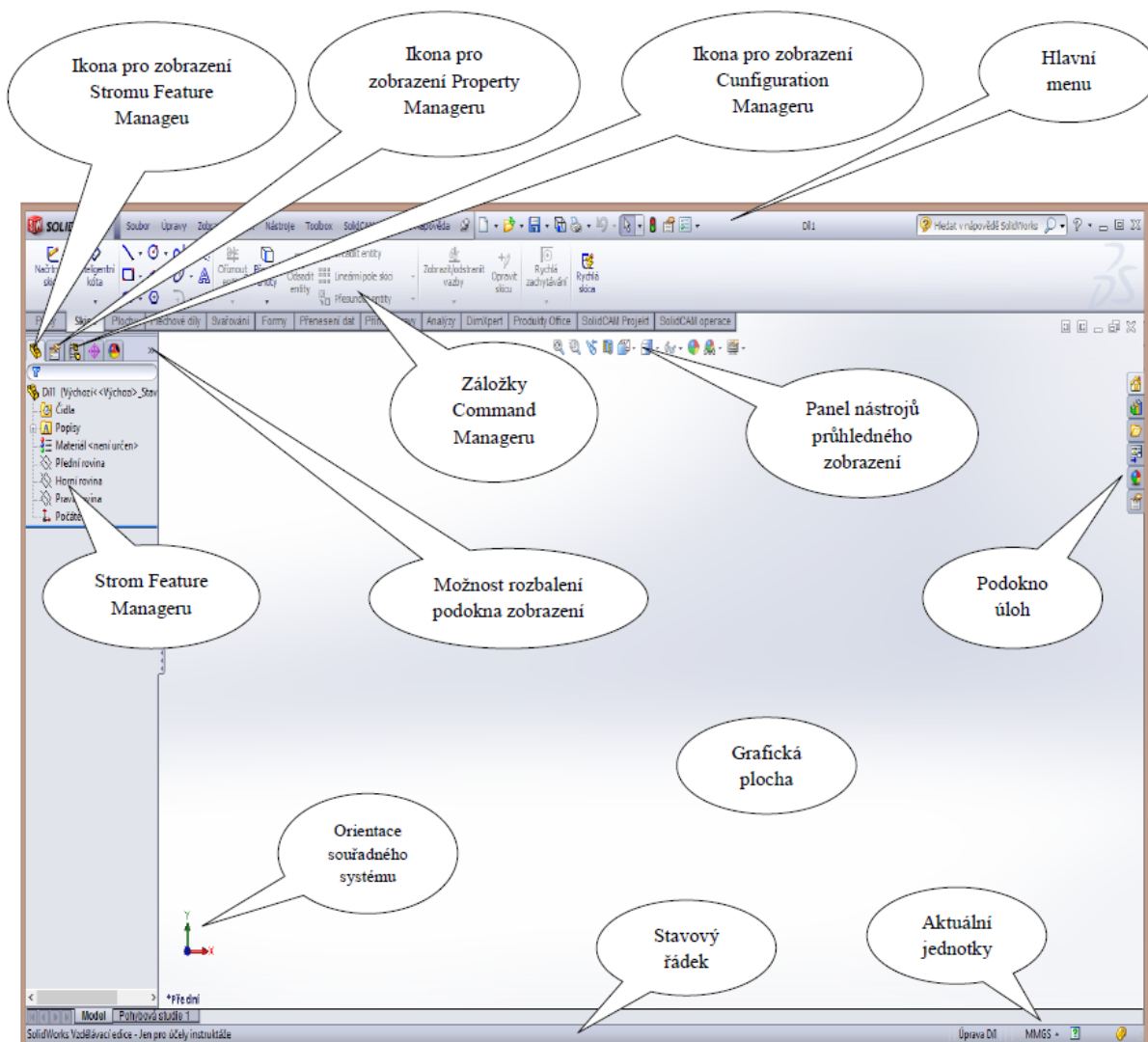
- otevřeme nový soubor a zvolíme základní jednotky modelu,
- začátkem modelu vždy je základní skica v 2D rovině,
- dále skica se kotuje, tj. každé hraně se přiřadí určitá velikost například v milimetrech,
- existuje 2 hlavní postupy pro transformaci 2D skici na 3D prvek: vytahováním skici z plochy na určitou délku nebo pootočení skici kolem referenční osy,
- po provedení jedné z těchto činností máme načrtnutý prvek, který bude mít jednoduchý tvar. Pro základní modely je to postačující, ale v případě, že díl má zaoblené hrany, zkosení, díry atd., budeme pokračovat s modifikací dílu,
- modifikace se provádí pomocí různých nástrojů a je aplikovaná přímo na vytvořený model. Zkosení a zaoblení hran realizujeme pomocí příslušných funkcí, díry – pomocí už použitého dříve vytahování profilu z plochy s tím, že teď materiál už bude odebrán ze základního objemu
- provedením všech požadovaných úprav dostaneme výsledný díl, který potom můžeme použít pro tvorbu podsestav, sestav nebo 2D výkresu.

U tohoto postupu ale existuje souhrn důležitých pravidel. Aby vytvořit model rychle, kvalitně a umožnit pohodlnou modifikaci modelu až po jeho realizaci, musíme na začátku modelování zamyslet nad postupem vzniku tvaru a rozměru součásti s ohledem na efektivní využití předložených nástrojů. Tady hovoříme o sestavení plánu, podle kterého bude jasně, jak se model bude chovat po provedení změny. Nejlepší variantou pro odstranění nežádoucích situací je analýza správného planu už v kroku skicování a kotování. Pomocí použití automatických (vznikají při tvorbě jednotlivých entit skici, například kolmost, svislost nebo vodorovnost) a přidáných (doplňují se do skic při jejich propojení související geometrie, například soustřednost, tečnost, sjednocení a kolineárnost) vazeb a správného kótování můžeme se docílit ideálního pro naši úlohu dílu. To znamená, že v případě provedení změny jakékoli entity dílu, jeho tvar, vlastnosti a ostatní charakteristiky budou zachované. Například při změně poloměru nějaké díry, vzdálenost její centru od okrajů a vzájemné rozpoložení vůči ostatním entitám bude zachována. Je to moc důležité z důvodu, že většinou každý díl je dále použit v sestavách, a nějaká drobná změna v jednom dílu může velice pokazit celou sestavu a zneužít vazby a reference [9].

3.3 Pracovní prostředí SOLIDWORKS

Níže na obrázku 10 můžeme vidět, jak vypadá pracovní prostředí aplikace a z jakých částí se skládá. Pohyb v prostředí je umožněn pomocí myši a je nutné uvést funkce každého z tlačítek:

1. **Levé** – vybírá objekty. Když chceme vybrat několik položek současně, zmačkneme tlačítko Ctrl a klepneme na každou položku. Výběrový rámeček se zobrazí jakmile zmačkneme a podržíme levé tlačítko. Přetáhneme jeho přes požadované položky;
2. **Pravé** – odpovídá za aktivaci místní kontextové nabídky. Obsah nabídky závisí na objektu, nad kterým je umístěn kurzor;
3. **Kolečko** – přibližování nebo oddalování grafické plochy. Když držíme a pohybujeme myší, dojde k pootočení prostoru ve směru pohybu myši.



Obr. 10 Pracovní prostředí SOLIDWORKS [9]

Grafická plocha – je to základní oblast prostředí, ve které kreslíme skici, zobrazujeme součástky a jejich výkresy, skládáme sestavy. V levém dolním rohu můžeme najít značku (3 navzájem kolmé šipky), které určují orientaci souřadného 3D systému. V pravém dolním rohu je oblast pro volbu základních jednotek (milimetry, metry, palce; kilogramy, gramy; sekundy, atd.), využití v modelu. V horní části plochy se nachází panel nástrojů průhledného zobrazení.

Panel nástrojů průhledného zobrazení – obsahuje běžné příkazy pro zobrazování grafické plochy a objektu pomocí různých pohledů. Pomocí daných příkazů můžeme přibližovat, otáčet a orientovat model, pochopit jak bude vypadat objekt v řezu nebo měnit styl zobrazení modelu (stínový s/bez hran, drátový s/bez hran, drátový, se stínem, perspektiva). Také tady jde vyměnit styl pozadí a zobrazit nebo skryt vazby, kóty, křivky, základní plochy a osy.

Strom Feature Manageru – zobrazuje strukturu součástí, sestavy nebo výkresu, dodává přehled o práci a postupu konstrukce. Mezi stromem a grafickou plochou je dynamické propojení. Výběrem položky ze stromu Feature Manageru můžeme přejmenovat entitu, vyměnit pořadí některých z funkcí, upravit základní skicu, také můžeme zastínit funkci nebo komponentu, aby byla neviditelná.

Property Manager – poskytuje nastavení pro většinu komponent a funkcí, jako jsou skici, zaoblení a zkosení, sestavy a podsestavy. Tady vždy je nějaké pole, kam zadáváme rozměry a parametry entit. Pro každou entitu Property Manager bude vypadat jinak.

Configuration Manager – umožňuje vytvářet, vybírat a zobrazovat více konfigurací částí a sestavy v dokumentu. Konfigurace jsou variace části nebo sestavy v rámci jednoho dokumentu. Například můžeme použít konfiguraci šroubu k určení různých délek a průměrů.

Command Manager – je kontextový panel nástrojů, který se dynamicky aktualizuje na základě aktivního typu dokumentu. Když klepneme na jednu ze záložek, aktualizují se a zobrazí související nástroje. Každý typ dokumentu, například součást, sestava nebo výkres, má pro každou záložku definovány odlišné úkoly. Obsah záložek je přizpůsobitelný, podobný panelům nástrojů. Například pokud klikneme na záložku Funkce, zobrazí se nástroje související s funkcemi. Můžeme také přidávat nebo odebírat nástroje, čím přizpůsobíme Command Manager. Když umístíme kurzor myši nad jakékoli ikonou, popis tohoto nástroje se zobrazí v doplňkovém okně.

Také SOLIDWORKS nabízí **klávesové zkratky** a **kontextová menu**. Příslušné kombinace kláves zrychlují práci v aplikaci, zatím co kontextová menu vysvětlují činnost nástrojů nebo umožňují tyto nástroje měnit, konfigurovat a nastavovat podle potřeb uživatele [8].

4 Technické prostředky pro řízení

Technologický rozvoj a výzkum v průmyslové oblasti za několik posledních století dovolil člověku přejít od ruční práci ke strojovému automatizovanému průmyslu. Mechanizace dovolila rozdělit výrobní proces na jednoduché dílčí operace, prováděné jednotlivými stroji, kterými ovládá člověk. Hlavní otázkou posledních desetiletí stalo **automatické řízení** – proces, při kterém člověk přestává být přímým účastníkem výrobních činností a jenom kontroluje výrobu pomocí uživatelských aplikací a občas provádí servisní opravy strojů při poruchách.

Přechod od ruční výroby k automatické prošel několika fázemi:

- výzkum v oblasti měření veličin, charakterizujících výrobní proces,
- sběr informací z několika měřicích míst a její následné vyhodnocení,
- realizace automatického ovládání a regulace (analogová),
- přechod z analogového zpracování dat na číslicové,
- přímé číslicové řízení a automatická optimalizace výrobních procesů,
- zdokonalení prostředků pro komunikaci mezi člověkem a strojem.

Výsledkem výše uvedených historických činností stal „objekt“, který může samostatně konat každou z těchto činností a produkovat požadované výsledky jenom s malým lidským zásahem. Pod takovým „objektem“ rozumíme pojem **systém** [10].

„Systémem rozumíme obecně soubor prvků, mezi nimiž existují vzájemné vztahy a jako celek má určité vztahy ke svému okolí“ [11].

Každý systém má dvě nejdůležitější základní vlastnosti:

1. chování systému. Tato charakteristika popisuje vnější vztahy k okolí a závislost systému na vlivech z okolí, které působí na jeho vstupy, což vyvolává příslušné odezvy, které se objevují na výstupech systému;
2. struktura systému, charakterizující jeho vnitřní funkční vztahy. Struktura popisuje vnitřní chování a organizaci systému, vzájemnou spolupráci prvku mezi sebou a bez ohledu na okolí, tj. tedy systém je brán jako uzavřená krabice.

Obě tyto vlastnosti systému jsou ve velmi úzkém vztahu, který lze charakterizovat jednak, že určité struktury odpovídá určité chování a naopak, že určitému chování odpovídá třída struktur, definovaná tímto chováním“ [11].

Pod **technologickými prostředky pro řízení** je chápáno technické vybavení, který je nutné pro zajištění takových činnosti jako: řízení (dosažení požadovaného cíle na základě daného algoritmu), ovládaní (způsob řízení bez ohledu na zpětnou vazbu) a regulace (s využitím zpětné vazby) výrobních procesů. V podstatě technologické prostředky pro řízení je systém, které se skládá z funkčních bloku a podsystému, které spolupracují a na základě nějakého algoritmu zpracují zadané vstupu, aby dostal požadované výstupu. To znamená, že pojem **systém** je neoddílnou částí dané kapitoly [10].

Klasifikace technických prostředku pro řízení

Podle funkce, kterou vykonává systém:

- pro získání informace
- pro transformace a přenos informace
- pro zpracování informace
- pro záznam informace
- pro využití informace
- pro zobrazení informace a styk s operátorem

Podle fyzikální veličiny, která je nositelem informace:

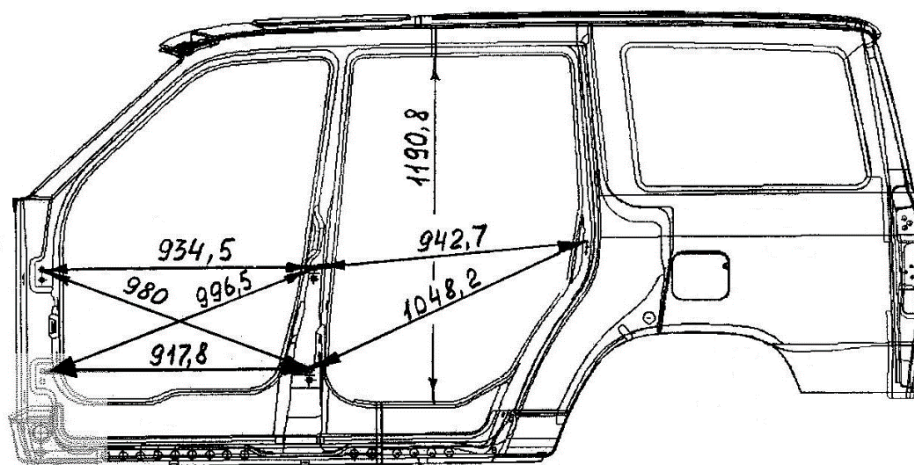
- mechanické
- elektrické
- pneumatické
- hydraulické
- optické
- kombinované

Na základě těchto rozdělení jde naznačit hlavní členy každého systému neboli technologické prvky pro řízení. To jsou: snímače veličin (měřicí převodníky), převodníky signálu (například A/D a D/A), pohony a akční členy, paměti (uložení dat a parametrů), sdělovače, hlásiče, ovládací/regulační systém, řídicí počítač (pro zpracování dat) a obrazovka (odpovídá za styk člověka se systémem) [10].

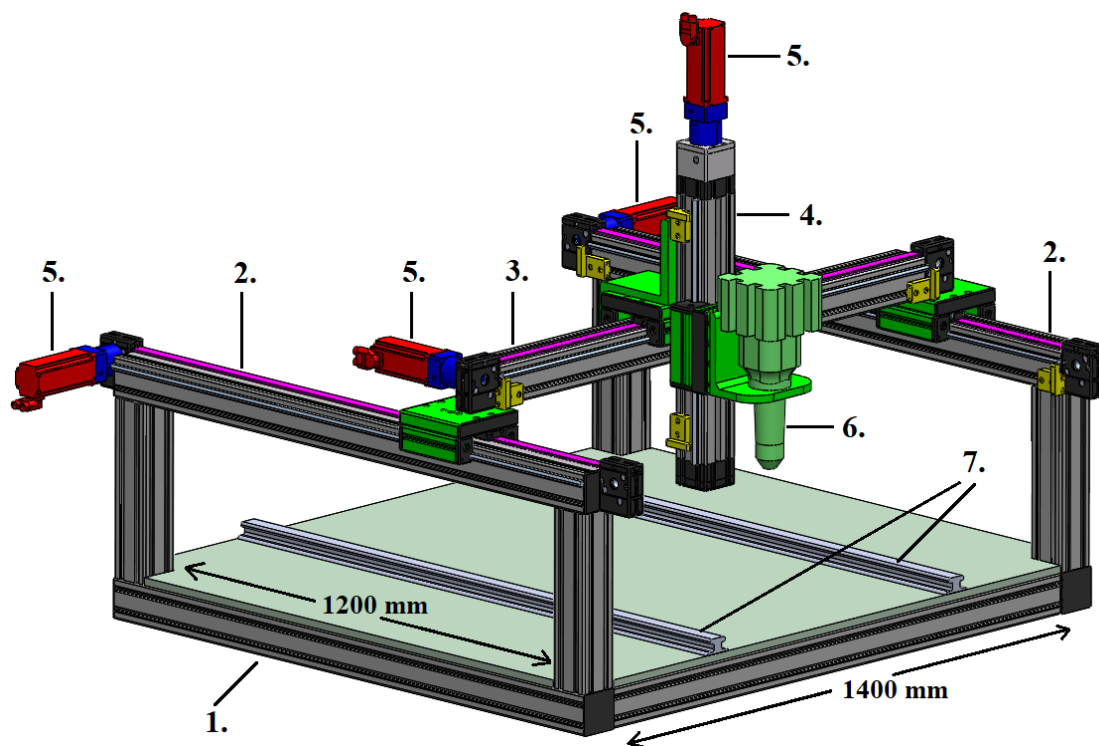
5 Koncepční model průmyslového stroje

V automobilovém průmyslu ruské pobočky společností Renault ultrazvukový svařovací proces metalické a plastové částí automobilových dveří je prováděn ručně. Lidský faktor ovlivňuje kvalitu daného procesu: svařovací agregát váží několik kilogram, proto s časem vzrůstá úroveň únavy a operátor nemůže svařovat s dostatečnou opakovatelností. V souvislosti s tím se objevila nabídka automatizovat daný proces, což by vedlo k zrychlení procesu a lepším výsledkům při výrobě.

Pomocí programu Solidworks byl navržen koncepční výhled modelu průmyslového polohovacího stolu (viz obr. 12). Stroj by se skládal z rámu, třech os, poháněcích prvků, svařovacího systému, kde hlavním bodem je jeho spodní koncový bod, tzn. efektor atd. Rozměry modelu vychází z reálných rozměrů různých automobilových dveří. Po krátkém výzkumu problematiky bylo zjištěno, že rozměry dveří u osobních aut Renault mají plochu zhruba 1000mm x 1200mm (viz obr. 11). Tyto délky byly brány jako orientační a na jejich základě byly určené velikosti zdvihů v dvou horizontálních osách: 1200 mm a 1400 mm úměrně. Taková volba způsobí dostatek místa pro vkládání dveří do pracovního prostoru stolu a ve stejném čase umožní nájezd svařovacího systému do krajních bodů dveří v případě potřeby. Bodové svařovací místa na dveřích se vždy nacházejí kolmo k vertikální ose a leží v paralelních rovinách tak, že odstup mezi nejzválenějšími rovinami je 30mm. Vertikální osa odpovídá jenom za přitlačování sonotrody k místu svaru a zvedání agregátu po ukončení procesu. Tím pádem pracovní prostor stolu (tzn. prostor určený koncovým bodem sonotrody) by byl 1200x1400x50 mm³.



Obr. 11 Rozměry dveří osobního auta



Obr. 12 Konceptní model polohovacího stolu

U navrhého modelu jde vydělit několik hlavních částí:

1. Stojan (je složen ze strojních profilů a plechu, který slouží podstavcem)
2. Rozdvojená horizontální osa X
3. Horizontální osa Y
4. Vertikální osa Z
5. Poháněcí systémy (převodovka s motorem, popřípadě další spojovací prvky)
6. Svařovací agregát (efektor)
7. Kolejnice

Jak by model měl fungovat

Konceptní návrh modelu vychází z už existujících polohovacích systémů. Model má dvě horizontální a jednu vertikální osu. Ke každé ose je připevněn vozík, který je klouzavým prvkem. Rozdíl spočívá v uložení os. První osa X by byla rozdvojená a připevněna k stojanu v několika místech tak, aby rám nebránil pohybu vozíků. Rozdvojení osy X je důležitým bodem. Toto odstraní nežádoucí mechanické napětí a průhyby profilů, dodá pevnost a zvětší životnost stroje. Jediná možná nevýhoda je nastavení souběžného fungování dvou motorů, aby vozíky osy X se hýbaly paralelně, ale je to řešitelná otázka. Na vozíky osy X pomoci šroubových spojů je připevněn profil

osy Y. Poslední, vertikální osa Z je zajištěna na vozíku osy Y. Tady použijeme doplňující spojovací komponenty, které by šlo vyrobit například z ocele pomocí frézy.

V modelu lineární vedení os je představeno tvarovaným profilem a směrovacími tyči se zarážkami (vydělené žlutou barvou) na jejích koncích pro omezení pohybu. Navíc na zarážkách by byly umístěny dotykové koncové spínače pro indikaci nájezdu vozíku do krajní polohy, což by zastavovalo odpovídající poháněcí systém.

Horizontální osy mají napozicovat efektor přímo nad místem svaru a udělat to co nejrychleji. Proto osy X a Y pracují na základě řemenových převodů (řemeny mají fialovou barvu na obrázku). Je to ten druh převodu, který dodává největší rychlosti při nájezdu a pracují s dostatečnou přesností, postačující pro danou úlohu. Třetí osa odpovídá za přitlačování agregátu a nepožaduje tak velké rychlosti (navíc délka zdvihu je mala), tady jsou požadované větší síly. Tato osa by používala převod pomocí trapézového nebo kuličkového šroubu. Trapézová matice by byla připevněna k vozíku a měnila rotační pohyb šroubu na translační pohyb podvozku, tzn. i svařovacího modulu, zajištěného na něm.

V modelu můžeme také pozorovat kolejnice. Nejsou nutným bodem a slouží jenom pro ukázkou toho, jak by se mohly dveře do modelu vkládat: na speciálním podvozku, který by jezdil po těchto kolejnicích například do nebo skrz stůl. Dveře už by byly předem správně orientované a rozmístěné na tomto podvozku pro existující algoritmus polohovacího stroje.

Celkový řídicí systém bude se skládat z čtyř motorů (dva pracují paralelně), převodovek, čtyř driverů (budou spojené s každým motorem) a kontrolérem. Monitorovacím systémem by byl počítač. Počítač bude propojen s kontrolérem, který ovládá drivery a sleduje funkčnost motorů a celkového procesu polohování pomocí programu, určeného pro danou úlohu. Program by šlo psát a editovat pomocí počítače a odpovídajícího prostředí a dále zasílat na kontrolér jako například update.

Daný model je virtuálním návrhem velkého průmyslového stroje, který je samozřejmě moc drahý pro výrobu v rámci univerzity. Navíc, návrh a modelování nového stroje je vždy komplikovaný proces. Proto daný model není konečná verze a může být přemodelován, předimenzován a slouží jako prvotní ukázkou myšleného stroje. Další kapitola se zabývá vývojem podobného stolu s tím, že to bude reálný laboratorní zmenšený model, vyrobený z reálných součástí, které jde koupit například v online obchodech.

6 Návrh laboratorního modelu

Laboratorní model polohovacího stolu nebude přímým odrazem reálného průmyslového stroje. Cílem návrhu daného modelu je rozbor procesu, jak podobný polohovací systém se navrhuje. Další otázkou je pochopit a vyzkoušet jak fungují mechanismy ovládání takového systému. Návrh bude vycházet z ohledem na snížení cen komponent a zvýšení jednoduchosti konstrukce pro lehčí sestavení. Prvním krokem jakéhokoliv návrhu je vždy rešerše a vyhledávání použitelných mechanismů a nástrojů pro zadanou úlohu.

6.1 Rešerše pro výběr komponent

Dana kapitola je rychlým popisem všech možných variant řešení převodů, vedení a motorů, které mohou být použité pro laboratorní model.

Druhy pohonů

Pohon pomocí šroubu a matice

V daném případě lineární posun vozíku po vedení je zajištěn pomocí převodu rotačního pohybu na lineární. Existuje několik různých variant tohoto řešení. Tady můžeme mít pohyblivou matici, nebo pohyblivý šroub. *Pohyblivá matice* se používá pro delší zdvihy a menší rychlosti posuvu. *Pohyblivý šroub* – v případě opačném. Také existují různé druhy šroubů. *Trapézové šrouby* jsou nejlevnější variantou a se vyznačují vysokou spolehlivostí, můžou být zatíženy většími axiálními silami. Nevýhodou je menší účinnost, rychlost polohování a životnost (kvůli opotřebení šroubu a matice). *Kuličkové šrouby* jsou podobné na trapézové s tím rozdílem, že v prostoru mezi závitem šroubu a matice se nacházejí kuličky. Tím vznikají menší tření a se objevuje možnost zatížení většími otáčkami, než u šroubu trapézových.



Obr. 13 Pohon pomocí šroubu a matice

Pohon pomoci hřebene

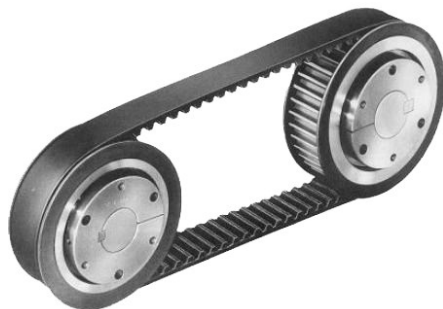
Princip tohoto pohonu je založen na odvalování ozubeného kola po hřebenu. Ve většině případu kolo je zajištěno na hřídeli převodovky nebo přímo motoru, které jsou umístěny na vozíku. Je to podoba pohybové matice. Výhody tohoto řešení jsou zatížení velkými axiálními silami a použití pro dlouhé zdvihy, které nedokážou umožnit jiné převody. Přesnost polohování závisí na výrobní přesnosti zubu pastorku a hřebene a na vůlích v převodovce motoru.



Obr. 14 Pohon pomoci hřebene

Pohon pomoci ozubeného řemene nebo řetězu

Řešení pohonu pomoci řemene nebo řetězu se používá pro úlohy, kde je potřebná vysoká rychlost polohování, ale menší přesnost. V daném provedení vozík je připevněn k určitému místu řemene a motor pohání jedno z ozubených kol (které je ve styku s řemenem), čímž provádí nájezd do požadované polohy. Výhodou je rychle polohování při velkých délkách zdvihu a vysokém zatížení, jednoduchá konstrukce a bezúdržbový provoz [1].



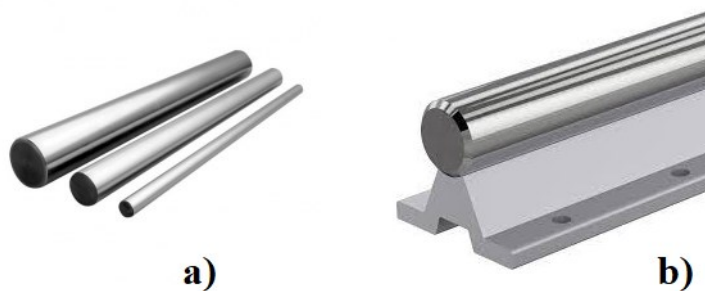
Obr. 15 Pohon pomoci řemene

Druhy lineárního vedení

Lineární vedení hraje roli směrovací jednotky, zajišťuje přesný pohyb vozíku po žádané trajektorii, eliminuje vliv nežádoucích sil a momentů na převodový mechanismus a dodává opornou funkci pro pohyblivé elementy. Každý z dále uvedených druhů vedení může být použit v kombinaci s jakýmkoliv převodem s předchozí kapitoly.

Nepodepřené vodící tyče

Je to cenově nejvýhodnější varianta. Existuje kluzná nebo valivá provedení. Princip spočívá v umístění uzavřených pouzder ve vozíku, která budou ležet na tyčích a sloužit oporným elementem. Jedna samotná tyč nedokáže zachytit radiální sílu a ohyb konstrukce, proto je vždy vhodné použít aspoň dvě tyče pro jednu lineární osu. S růstem délky vzrůstá šance průhybu, takže je nutno počítat s omezenou tuhostí tyčí.



Obr. 16 a) Nepodepřené, b) podepřené vodící tyče

Podepřené vodící tyče

Tento druh vedení má větší pevnost. Jenom jedna taková tyč bude dostatečná pro omezení ohybu vedení kolem osy a v případě, že podepření je po celé délce tyče, bude eliminována možnost průhybu. Tato konstrukce používá otevřená pouzdra.

Tvarové vedení

Dané vedení je oproti předchozím schopno: odstranit veškeré nepožadované síly a momenty, přenášet řadově větší zatížení při zachování životnosti a osadit jednu osu samostatně. Forma vedení se liší pro různé úlohy. Nevýhodou je vysoká cena, která však je důsledkem velké řady užitečných charakteristik [1].

Motory

Každá osa musí být osazena poháněcím prvkem, což jsou většinou elektrické motory. Umístění motoru vždy závisí na konkrétní úloze a může být v ose vedení nebo mimo osu. Také může existovat potřeba přidání převodovky, drivesetu a spojek pro připevnění motoru například ke hřídeli kuličkového šroubu nebo soukolí řemenového převodu.

Krokové motory

Krokové motory jsou stejnosměrné motory, které se pohybují po krocích. Mají několik cívek, které jsou uspořádány do skupin nazývaných „fáze“. Napájením každé fáze v sekvenci se motor bude otáčet po jednom kroku. Pomocí krokování řízeného počítačem můžeme dosáhnout velmi přesného polohování nebo regulace rychlosti. Z tohoto důvodu jsou krokové motory motorem mnoha aplikací pro přesné řízení pohybu. Krokové motory mohou být různých velikostí, stylů a elektrických charakteristik. Ale při velkých zatíženích může dojít ke kritickému stavu a ztrátě kroku. Je to levnější varianta pro pohon lineární osy.

Servomotory

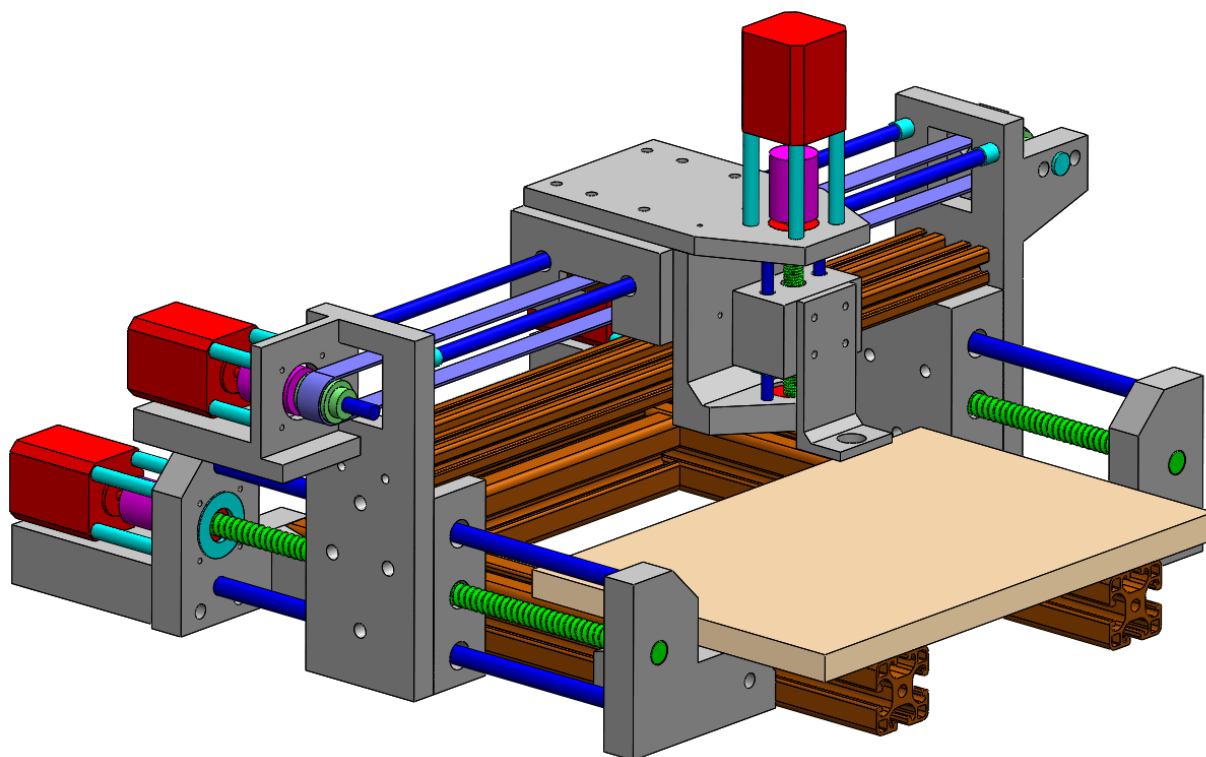
Jsou to ovládací zařízení pro přesnou kontrolu rychlosti, točivého momentu a polohy. Mají lepší výkon a přesnost ve srovnání s prvky založenými na frekvenčních měničích, protože tyto nenabízejí řízení polohy a mají nízkou účinnost při nízkých rychlostech. Servomotor je zařízení, které obsahuje kodér, který převádí mechanický pohyb (otáčení hřídele) na digitální impulzy interpretované ovladačem pohybu. Obsahuje také ovladač a společně vytvářejí obvod, který řídí polohu, točivý moment a rychlost. Jejich hlavní specifikace jsou točivý moment a rychlost. Servomotory lze nalézt v zoomech fotoaparátu, výtahových dveřích nebo nástrojích, které můžeme mít doma.

Volba mechanické části systému

Z ohledem na nižší ceny, menší náročnost kompletace, a postačující parametry přesnosti pro mechanickou část laboratorního modelu volím pohon pomocí *trapézového šroubu s pohyblivou maticí*, lineární vedení pomocí *ocelových nepodepřených tyčí*, *krokové motory* pro pohanění šroubu a *strojní profily* jako součást rámu a oporných elementů konstrukce.

6.2 Mechanická část modelu

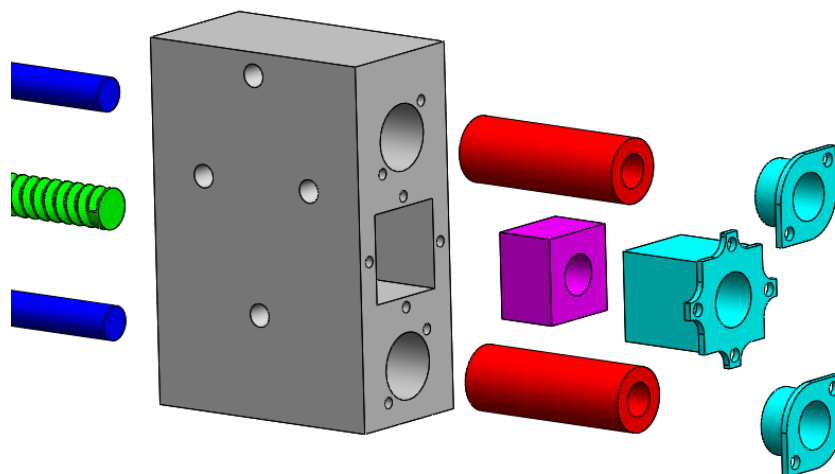
Na obrázku 17 můžeme vidět navrhovaný virtuální model laboratorního stroje. Model je vytvořen v reálných rozměrech. Součástky jsou pobarvené na základě použití stejného materiálu pro výrobu a na základě konání stejné funkce. Virtuální model je přesným odrazem reálného laboratorního polohovadla. Hnědou barvou jsou vyznačeny strojní profily, které byly použity pro podstavec a připevnění bočních opor pro druhou a třetí osy. Tyto profily jsou zakoupené od firmy HABERKORN a jsou vyrobené ze slitiny hliníku a mají hustotu 2700 kg/m^3 . Každá šeda součástka je jedinečným návrhem a je vyrobená pomocí 3D tiskárny z PLA plastu, který má hustotu 1240 kg/m^3 . Tmavomodrou barvou jsou označeny ocelové vodící tyče o průměru 10, 8 a 6 mm a hustotě 7850 kg/m^3 . Tyče mají směrovací a opornou funkci a musí mít dostatečnou tuhost, aby nedošlo k průhybu. Kontrola tyče na průhyb bude provedena v další kapitole. Trapézové šrouby v modelu mají zelenou barvu a konají pohonnou funkci ve spojení s krokovými motory (červená barva). Každý trapézový šroub je uložen z obou stran v ložiskách a pohaní vozíky pomocí trapézových matic, které jsou upevněné na vozíku a tím přeměňují točivý pohyb na lineární.



Obr. 17 Virtuální model laboratorního modelu

Na obrázku 18 můžeme vidět složení dvou spodních vozíků, použitých v modelu (složení dvou dalších je podobné). Kostra má šedou barvu a je základem součástky. Má tři velké otvory pro vkládání ložiskových trubek (pro styk s ocelovými tyči) a trapézové matice (pro navázání převodu

s trapézovým šroubem). Ložiska jsou červená. Trapézová matice má fialovou barvu. Tyrkysovou barvou jsou označené přitlačující součástky. Budou vyrobené na 3D tiskárně z plastu menší tuhosti a budou bránit proti vysunutí ložisek a matice z kostry. V kostře a v přitlačných součástkách jsou malé díry pro šroubky, kterými spojíme díly.

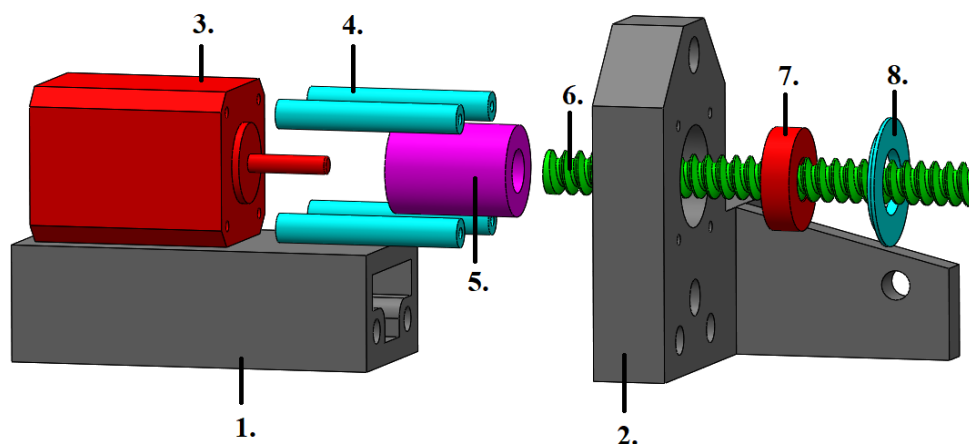


Obr. 18 Složení vozíku

Na dalším obrázku je znázorněn způsob propojení motoru s trapézovým šroubem a jeho připevnění k oporným součástkám. Popis komponent:

1. Podstavec pod motor (základ modelu)
2. Oporná plastová součástka (základ modelu)
3. Krokový motor
4. Plastová trubka pro spojení motoru a základu
5. Pružná spojka s proměnným vnitřním průměrem pro přenos momentu motoru na šroub
6. Trapézový šroub o průměru 12 mm
7. Ložisko pro uložení trapézového šroubu v otvoru
8. Plastový pojistný kroužek vyrobené na 3D tiskárně

Komponenty základu mají několik otvorů pro připevnění k rámu z hliníkových profilů pomocí šroubů. Ložisko bude vsunuté do otvoru a upevněno plastovým kroužkem z obou stran. Trapézový šroub bude procházet skrz ložisko do pružné spojky, která ho připevní ke hřídeli krokového motoru. Motor bude stát na podstavci a pomocí 4 plastových trubek a šroubků připevněn k základu.



Obr. 19 Propojení pohonné a mechanické části modelu

Tento kapitola popisuje složení laboratorního modelu a zajímá se otázkou realizace s hlediska mechanických napětí a sil. Model byl vytvořen pomocí prostředí SOLIDWORKS. Dany program dovoluje přiřadit každé součástce reálný existující materiál včetně jeho vlastností. Ve stejném čase program automatický ví objem každé vyrobené součástky, což ve spojení dodává možnost rychle odečíst reálnou hmotnost libovolné komponenty. Proces je jednoduchý: musíme otevřít nástroje programu, dále záložku „Evaluate“ a dále variantu „Mass properties“ a zvolit komponenty v modelu. Program rychle vypočte různé užitečné údaje a zobrazí jich v okně (viz obr. 21). Tady můžeme vidět objem, plochu povrchu součástky, umístění těžiště, atd.

```
Mass properties of levy_bocni_drzak
Configuration: Default
Coordinate system: -- default --

Mass = 422.57 grams

Volume = 335369.69 cubic millimeters

Surface area = 63945.81 square millimeters

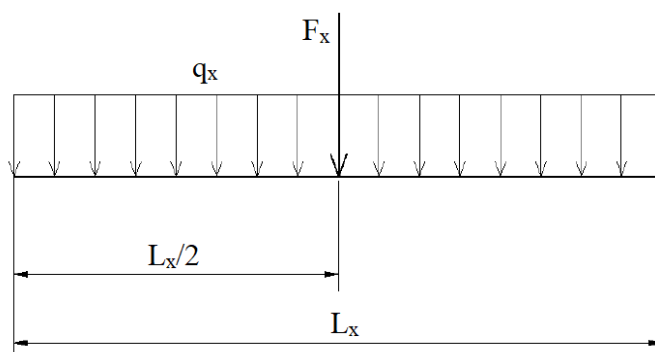
Center of mass: ( millimeters )
X = -181.05
Y = 259.57
Z = -8.48
```

Obr. 20 Vlastností součástky

Pomocí dané funkce byla spočítána celková hmotnost pohyblivé části konstrukce. Základním bodem této části jsou dva dolní vozíky, které drží konstrukci na 4 ocelových tyčích a konají pohyb po jejich povrchu. Celková hmotnost pohyblivé části (bez ložisek, plastových kroužků, trubek a spojovacích šroubků a matic) se rovná 4,2 kg.

Kontrola průhybu ocelových tyčí osy X

Před realizací modelu je nutno spočítat, jestli čtyři vodící ocelové tyčí dokážou přenášet zatížení hmotou konstrukcí. Délka každé tyče $L_x = 310 \text{ mm}$. Hmotnost tyče byla zjištěna pomocí programu SOLIDWORKS $m_t = 0,191 \text{ kg}$. Výpočty byly provedené na základě strojírenské odborné literatury [13].



Obr. 21 Průhyb tyče

Modul pružnosti v tahu pro ocel $E = 210 \text{ GPa}$

Kvadratický moment průřezu $I = 491 \text{ mm}^4$

Zatížení vlastní tíhou tyče:

$$q_x = m_t \cdot g \quad (11)$$

$$q_x = 0,191 \cdot 9,81 = 1,87 \text{ N/m}$$

Zatížení tyče od nesených komponentů:

$$F_x = m_x \cdot g \quad (12)$$

$$F_x = 1,25 \cdot 9,81 = 12,26 \text{ N/m}$$

Průhyb od vlastní tíhy tyče:

$$W_{xq} = \frac{q_x \cdot L_x^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (13)$$

$$W_{xq} = \frac{1,87 \cdot 0,31^4}{384 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 491 \cdot 10^{-12}} = 0,00044 \text{ mm}$$

Průhyb tyče od nesených komponentů:

$$W_{xF} = \frac{F_x \cdot L_x^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (14)$$

$$W_{xF} = \frac{12,26 \cdot 0,31^3}{48 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 491 \cdot 10^{-12}} = 0,0737 \text{ mm}$$

Celkový průhyb ocelové tyče:

$$W_x = W_{xq} + W_{xF} \quad (15)$$

$$W_x = 0,00044 + 0,0737 = 0,07414 \text{ mm.}$$

Celkový průhyb tyče $W_x < W_{Dov}$. Tyče dokážou přenést zatížení.

6.3 Volba pohonné části systémů

Jak už bylo řečeno, v mechanické části systému budou použity trapézové šrouby, matice a řemenový převod pro pohanění vozíků po lineárním vedením ve výhledu vodících tyčí. Z ohledem na cenu a jednoduchost realizace laboratorního modelu bude vhodné použít krokové motory, které budou kompaktní a v současné době pohánějí například 3D tiskárny. Rozhodovacím bodem při volbě určitého druhu motoru budou strojní výpočty na základě strojírenských tabulek pro návrh CNC strojů [14].

Vypočet momentu motorů

Každý spodní krokový motor bude připevněn k trapézovému šroubu pomocí pružné spojky. Průměr šroubu je 12 mm se stoupáním 3 mm. Šroub bude z obou stran uložen v jednořadých kuličkových ložiskách, kde parametry součinitelů tření budou dané tabulkově.

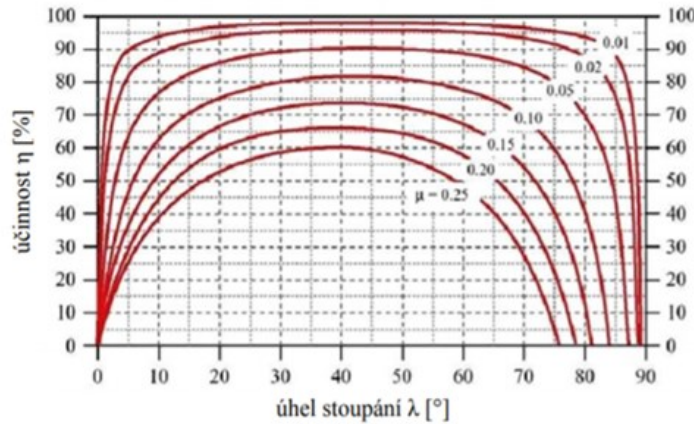
Tab. 2 Parametry převodu

Název	Hodnota
Síla axiální	$F_A = 215 \text{ N}$
Stoupání šroubu	$s = 3 \text{ mm}$
Průměr trapézového šroubu	$d_n = 12 \text{ mm}$
Střední průměr trapézového šroubu	$d_s = 10,25 \text{ mm}$
Průměr hřídele pro ložisko	$d_L = 12 \text{ mm}$
Součinitel tření ve vodících plochách	$f_1 = 0,15$
Součinitel tření na šroubu	$f_2 = 0,15$
Součinitel tření na poloměr čepu	$f_3 = 0,003$
Hmotnost pohyblivé části	$m = 5 \text{ kg}$
Účinnost převodu	$\eta_p = 1$
Účinnost šroubu	$\eta_s = 0,35$
Účinnost ložisek	$\eta_L = 0,95$
Převod (pro přímý pohon)	$i = 1$

Úhel stoupání λ pro odečet účinnosti trapézového šroubu s lichoběžníkovým závitem η_s zjistíme pomocí vzorce:

$$\lambda = \arctg\left(\frac{s}{\pi \cdot d_n}\right) \quad (16)$$

$$\lambda = \arctg\left(\frac{3}{\pi \cdot 12}\right) = 4,55^\circ$$



Obr. 22 Účinnost šroubu s lichoběžníkovým závitem [14]

Potřebný moment motoru pro pohnání polohovacího systému:

$$M_m = \frac{F_A \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_p} + M_{zrnhm} \quad (17)$$

Moment zátěže redukovaný na hřídel motoru M_{zrnhm} je složen ze složek:

- Moment od tíhové složky působící při skloněném vedení:

$$M_{GT} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s} \quad (18)$$

$$\alpha = 0^\circ \rightarrow \sin \alpha = 0 \rightarrow M_{GT} = 0.$$

- Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot:

$$M_G = \frac{m \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_L \cdot \eta_p} \quad (19)$$

$$M_G = \frac{5 \cdot 9.81 \cdot 0,15 \cdot 1 \cdot 0,003}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 0,35 \cdot 0,95 \cdot 1} = 0,0071 \text{ Nm}$$

- Moment zátěže od třecích sil v ložisku a předeprnutí šroubu:

$$M_L = \frac{0,5 \cdot (F_A + m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f_1) \cdot d_L \cdot f_3}{i \cdot \eta_p} \quad (20)$$

$$M_L = \frac{0,5 \cdot (215 + 5 \cdot 9,81 \cdot 1 \cdot 0,15) \cdot 0,012 \cdot 0,003}{1 \cdot 1} = 0,002668 \text{ Nm}$$

$$M_{KSM} = \frac{s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_p \cdot \eta_L} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{0,5 \cdot (F_A + m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot f_1) \cdot d_s \cdot f_2}{i \cdot \eta_p \cdot \eta_L} \quad (21)$$

$$M_{KSM} = \frac{0,003}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,95} \cdot (1 - 0,35^2) + \frac{0,5 \cdot (215 + 5 \cdot 9,81 \cdot 1 \cdot 0,15) \cdot 0,01025 \cdot 0,015}{1 \cdot 1 \cdot 0,95} =$$

$$= 0,00038 \text{ Nm}$$

- Moment při redukci sil na hřídel motoru

Třecí síla v kluzném vedení pro $\alpha = 0^\circ$, $a = 0$

$$F_{TV} = \frac{3 \cdot F_A \cdot a \cdot f_1}{L} + m \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \quad (22)$$

$$F_{TV} = 0 + 5 \cdot 9,81 \cdot 0,15 \cdot 1 = 7,3575 \text{ N}$$

$$M_F = \frac{F_{TV} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_L \cdot \eta_p} \quad (23)$$

$$M_F = \frac{7,3575 \cdot 0,003}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 0,35 \cdot 0,95 \cdot 1} = 0,0088 \text{ Nm}$$

Celkový statický moment zátěže redukovaný na hřídel motoru:

$$M_{zrnhm} = M_{GT} + M_G + M_L + M_{KSM} + M_F \quad (24)$$

$$M_{zrnhm} = 0 + 0,0071 + 0,002668 + 0,00038 + 0,0088 = 0,0189 \text{ Nm}$$

Potřebný moment motoru:

$$M_m = \frac{215 \cdot 0,003}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1} + 0,0189 = \mathbf{0,1216 \text{ Nm}}$$

Zvolené parametry motorů

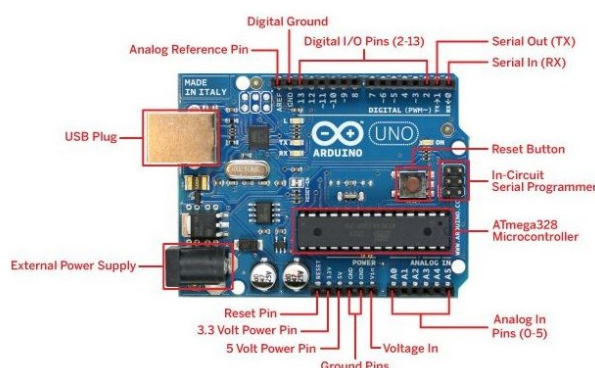
Na základě vypočtené veličiny zatěžovacího momentu je jasné, že bude vhodné zvolit motor se statickým momentem nad 0,1216 Nm. Pro laboratorní model volím dvoufázové krokové motory se jmenovitým momentem 0,48 Nm. Větší moment dovolí překonat zatížení při vyšších otáčkách a zajistí pevnost, že nedojde ke kritickým situacím. Pro laboratorní model budou použity 4 takové krokové motory: 2 pro pohnutí polohovacího systému v ose X, a jeden pro každou ze zbývajících os. Vzhledem k tomu, že výpočet momentu byl proveden pro zatížení první osy a pro hmotu 5kg, která je větší, než je skutečná hmotnost celkové pohybové části systémů, zvolené motory budou vhodné pro pohnutí každé osy.

6.4 Výběr řídicích prvků

Řídicí část bude se skládat z:

- Arduino Uno (bude sloužit procesorem systému)
- Čtyř driveru (ovládání každého z krokových motorů)
- Shieldu (deska pro navázání komunikace mezi Arduino a drivery)
- Počítače (programování a zaslání algoritmů na Arduino)
- Zdroje napětí pro pohanění motorů

Arduino Uno [15]

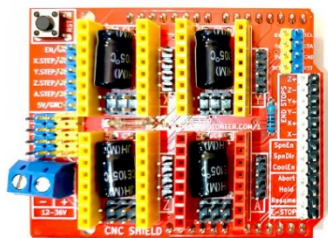


Obr. 23 Arduino Uno [15]

Arduino Uno je řadič postavený na mikrokontrolleru ATmega328. Platforma má 14 digitálních vstupů/výstupů (z nichž 6 lze použít jako výstupy PWM), 6 analogových vstupů, krystalový generator 16 MHz, konektor USB, napájecí konektor, konektor ICSP a resetovací tlačítko. Chceme-li pracovat, musíme připojit platformu k počítači pomocí kabelu USB nebo připojit napájení pomocí AC/DC adaptéru nebo baterie [15].

CNC Shield V3.0 [16]

CNC Shield V3.0 se používá ve spojení s řadičem Arduino Uno R3 k řízení CNC strojů, průmyslových robotů atd. Mikrokontrolér Arduino umožňuje pracovat se strojem samostatně nebo vzdáleně přes port USB. Shield může použít až 4 ovladače k řízení pohybového systému. Pro ovládání se používá firmware Arduino GRBL. Výměna informací o firmwaru (GRBL) mikrokontroléru a počítače probíhá pomocí G-kódů. Na typovém štítku CNC V3 jsou nainstalovány koncové kolíky pro připojení periferních zařízení, například můžete vytvořit tlačítko pro nouzové zastavení stroje. Široká funkčnost umožňuje použít rozšiřující kartu k vytváření různých projektů [16].



Obr. 24 CNC Shield V3 [16]

Driver Pololu A4988 pro krokové motory [17]

Parametry:

- Nastavitelné omezení proudu
- 5 rozlišení: celý krok, půl krok, 1/4- kroku, 1/8- kroku, 1/16- kroku
- Tepelná, napěťová a proudová ochrana
- Logické napájecí napětí: 3 – 5,5 V
- Napájecí napětí motoru: 8 – 35 V



Obr. 25 Driver Pololu A4988 pro krokové motory [17]

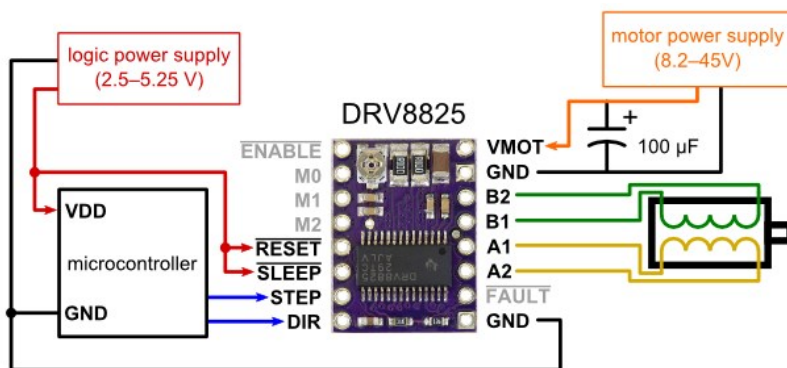
Driver DRV8825 pro krokové motory [18]

Parametry:

- Nastavitelné omezení proudu
- 6 rozlišení: celý krok, půl krok, 1/4- kroku, 1/8- kroku, 1/16- kroku a 1/32- kroku
- Max proud 1,5A (2.2A s aktivním chlazením)
- Tepelná, napěťová a proudová ochrana
- Napájecí napětí 8,2 - 36V.



Obr. 26 Driver DRV8825 pro krokové motory [18]



Obr. 27 Schéma zapojení Drv8825 [18]

Napájecí zdroj Sunny SYS1319-3012 [19]

Parametry:

- Vstupní napětí AC: 100...240V
- Vstupní proud AC: 1A
- Frekvence: 50...60Hz
- Výstupní napětí: 12V
- Výstupní proud: 2,5A
- Výkon: 30W
- Účinnost: 83.5%
- Integrované ochrany: Přetížení, zkrat, přepětí
- Pracovní teplota: 0...40°C

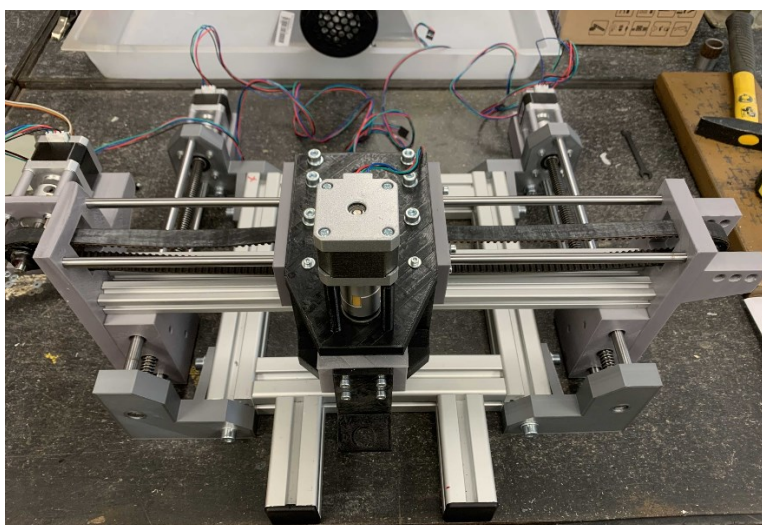


Obr. 28 Spínaný zdroj MEAN WELL RS-50-24 [19]

7 Montáž modelu

V době, kdy každý dílčí element modelu byl zakoupen a nachystán, nastává čas fyzické montáže modelu. Součástky jako ložiska, trapézové šrouby, matice, vodící tyče atd. už byly připravené. Jediná zakoupená součástka, která potřebovala úpravu, byla řemenice. Vznikla potřeba provrtat v ni díru o průměru 8mm a nalisovat ji na odpovídající tyč, kde ji zajistit pomocí kolíku. Každý element, tištěný na 3D tiskárně, vyžadoval další úpravy. Mezi tyto úpravy patřilo broušení některých hran, zvětšování průchozích děr vrtákem aby se umožnilo volné vkládání šroubu, postupné vrtání závitů odpovídajících velikostí atd.

Základem modelu slouží spodní rám z těžkých průmyslových profilů 40x40 mm. K tomuto rámu byly přišroubované čtyři plastové obrobky, které jsou oporou pro pohyblivou část modelu. Ložiska pro trapézové šrouby byla vložena do těchto obrobků. Dalším krokem bylo smontování všech možných vozíků: vkládání trapézových matic a ložiskových trubek do odpovídajících děr a jejich zajištění pomocí tištěných vložek. Dále vozíky byly nasazené na vodící tyče. Konce tyčí byly nalisované do oporných elementů. Následovně opory osy Y byly přišroubované k vozíkům osy X a předem poskládaná osa Z zajištěná na vozíku osy Y. Cílem bylo vytvořit rozebiratelný model, takže všude byly použité šroubové spoje pro lehkou demontáž v případě výměny nějaké poškozené součástky. Posledním bodem bylo vkládání trapézových šroubů do matic vozíku, zajištění řemene na řemenicích a namontování krokových motorů na svoje místa.



Obr. 29 Realizovaný model stolu

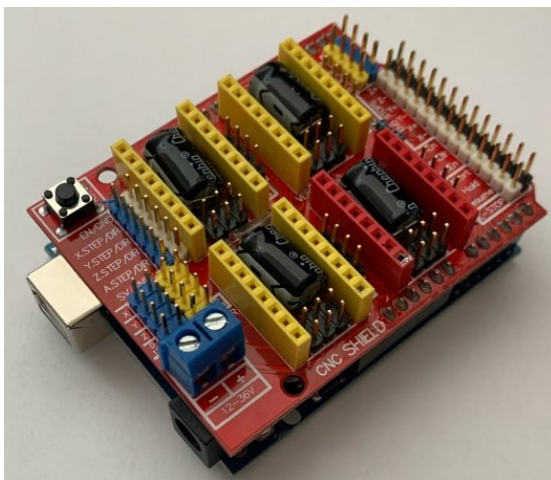
Po těchto operacích mechanická část laboratorního modelu je realizována (viz obr. 37). Dalším cílem je realizace řídicího systému.

8 Realizace, komunikace a konfigurace řídicího systému

Sestavení ovládacího systému se skládá z několika kroků. Na začátku jde fyzické zapojení součástek, dále omezení napětí a proudu na drivech, na konci naprogramování a naladění ovládacích kódů a programů.

Sestavení sendvičů z Arduino Uno a CNC Shieldu

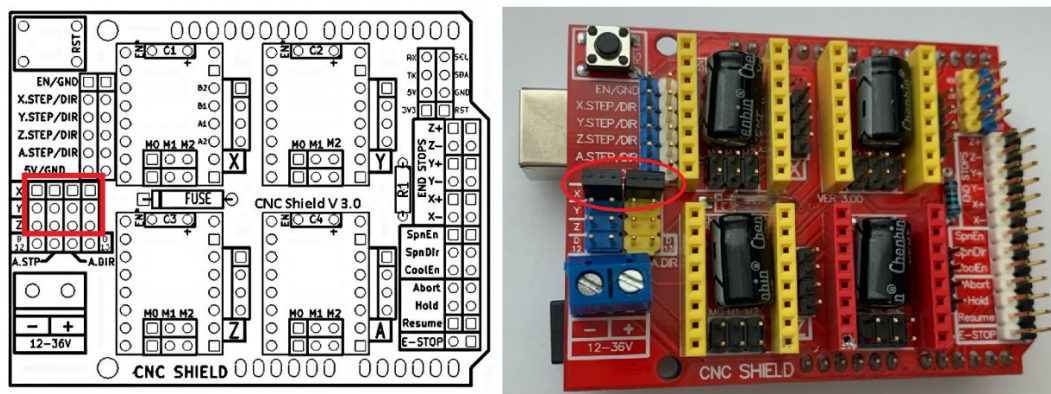
Na obrázku níže můžeme vidět dané zapojení. Orientace Shieldu je taková, že napájecí svorkovnice (12 - 36V) Shieldu musí se nacházet nad DC konektorem Arduino.



Obr. 30 Sendvič z Arduino Uno a CNC Shieldu

Nastavení paralelního fungování dvou motorů pro jednu osu

Deska CNC Shield je zajímavá tím, že umožňuje paralelizaci krokových motorů pro kteroukoli z os. To umožní bez problémů implementovat projekty se dvěma krokovými motory na jedné ose. K implementaci této funkce je nutné nainstalovat dvě propojky (jumpery) na odpovídající výstupy naproti požadované osy. Na obrázku 31 vlevo je ukázáno, kde se nacházejí kontakty pro paralelizaci os. Tady máme čtyři možnosti: paralelizace os X, Y nebo Z (místo je vyděleno červeným obdélníkem) nebo aktivace čtvrtého driveru jako samostatného pro nějakou další pomocnou osu. V dané práci je nutno paralelizovat osu X, takže dva jumpery byly nainstalované na odpovídající místa. Zapojení můžeme vidět na obrázku 31 vpravo. Propojky jsou vydělené červeným oválem. Takže v daném případě každý signál, zaslaný na driver osy X bude duplikován na driver osy A (je odlišná od ostatních barvou plastové svorkovnice – je červená, ostatní jsou žluté).



Obr. 31 Nastavení paralelního fungování dvou motorů pro osu X

Nastavení proudu driverů krokových motorů

Nastavení proudu driveru musí být provedeno k vyřešení několika velmi důležitých bodů:

- snížení pravděpodobnosti přeskočení kroků při nízkém proudu
- snížení zahřívání driveru a krokového motoru při vysokých napětích
- snížení hluku při vysokých proudech

Pro správné nastavení omezení proudu musíme zjistit maximální proud používaných motorů. Pro pohanění stolu na základě strojírenských výpočtů byly zvoleny čtyři krokové motory Nema 17 od GM ELECTRONIC. Parametry motorů jsou uvedené v tabulce 3.



Obr. 32 Krokový motor Nema 17 [20]

Tab. 3 - Vlastnosti krokového motoru Nema 17 [20]

Typ	Délka kroku (°)	Maximální proud (A)	Fázový odpor (Ω)	Počet kontaktů (-)	Přidrzná síla (Nm)
JK42HS40-1704	1,8	1,7	1,65	4	0,48

Hodnota maximálního proudu pro daný typ motoru je $I_{Max} = 1,7A$. Pro ovládání těchto motorů byly vyzkoušeny 2 typy driverů: Pololu A4988 a Drv8825. Každý driver musí mít svoje omezení, vypočtené pomocí odpovídajících vzorců. Pro A4988 platí vzorec:

$$V_{Ref} = I_{Max} * 8 * 0,068 \quad (25)$$

Vzhledem k tomu, že provozní proud motoru se obvykle doporučuje omezit na 70% maximálního proudu, aby se snížilo přehřátí motoru, musí být získaná hodnota vynásobena 0,7.

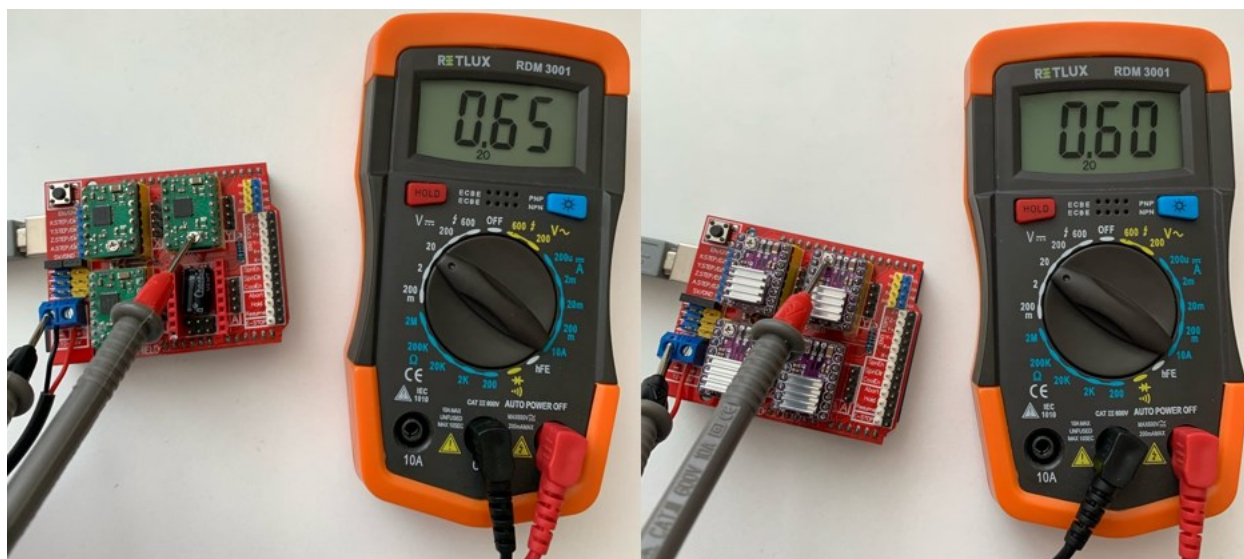
$$V_{Ref} = 1,7 * 8 * 0,068 * 0,7 = 0,64736V \approx 0,65V$$

Pro Drv8825 platí:

$$V_{Ref} = I_{Max}/2 \quad (26)$$

$$V_{Ref} = 0,7 * 1,7/2 = 0,6V.$$

K nastavení dochází v plném kroku, bez užití mikrokrokování. Konfigurace se provádí pro každý driver zvlášť, v slotu, ve kterém bude dále používán. Musíme nainstalovat drivery do odpovídajících slotů CNC Shieldu a připojit desku k počítači pomocí kabelu USB. Zapnout měření stejnosměrného napětí na multimetru proti poloze „20“. Pro měření napětí je nutné připojit zápornou sondu k minusové svorkovnici na Shieldu a kladnou sondu k ladicímu rezistoru driveru. Je nutné otáčet ladicí rezistor, dokud multimetr neukáže požadovanou hodnotu napětí. Nastavení vypočítaných hodnot se musí zopakovat pro všechny aktivní drivery v sestavě. Na obrázku 33 nastavené V_{Ref} pro drivery osy Y.



Obr. 33 Omezení proudu driverů osy Y

Po nastavení proudu je nutné vyjmout drivery krokových motorů, a přejít k dalšímu bodu.

Nastavení mikrokrokování

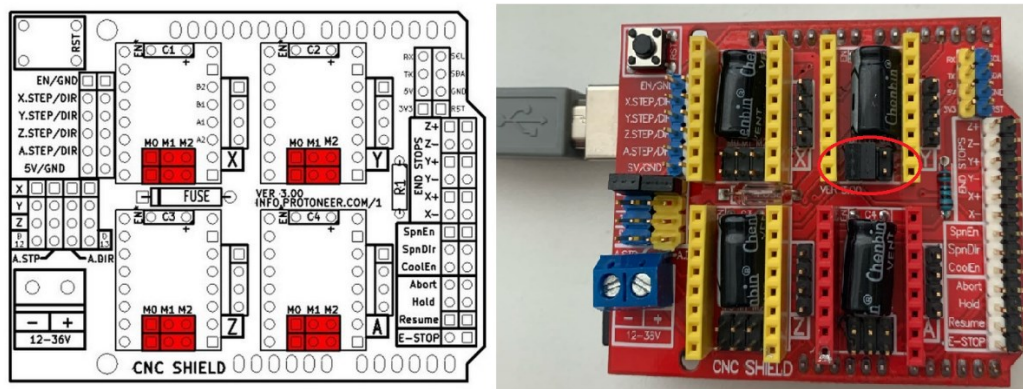
Při řešení mikrokrokování je nutno pamatovat následující body:

- Zvýšení mikrokroku vede ke ztrátě točivého momentu na krokovém motoru
- Vysoké hodnoty mikrokroku nevedou k vícenásobnému zvýšení přesnosti zařízení v důsledku přítomnosti vůle v pohyblivých konstrukčních prvcích

Nastavení mikrokroku má vliv na přesnost polohování modelu, která bude řešena už po kompletaci modelu a jeho následujícím nalaďení. V tabulce 3 jsou uvedena možná nastavení mikrokroku a odpovídající umístění jumperů v slotech M0, M1 a M2 pro Drv8825. Na obrázku 34 jde vidět, kde se nachází dane sloty a také příklad zapojení 1/8 kroku pro osu Y, která bude pohanět řemenový převod. Přesnější popis mikrokrokování bude popsán v následující části práce.

Tab. 4 – Nastavení mikrokroku pro Drv8825 pomocí jumperů

M0	M1	M2	Počet mikrokroku
-	-	-	Celý krok
Zapojen	-	-	Půl krok
-	Zapojen	-	1/4 step
Zapojen	Zapojen	-	1/8 step
-	-	Zapojen	1/16 step
Zapojen	-	Zapojen	1/32 step
-	Zapojen	Zapojen	1/32 step
Zapojen	Zapojen	Zapojen	1/32 step



Obr. 34 Umístění propojek pro nastavení mikrokroku

Po nastavení mikrokroku je třeba nainstalovat drivery krokových motorů zpátky.

Připojení napájení

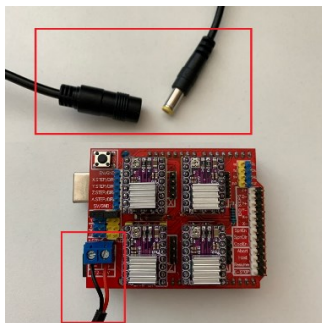
Kromě připojení Arduino k počítači pomocí kabelu USB musíme připojit konektor napájecího napětí. USB kabel dodává pouze logické napětí, které není dostatečné pro pohanění motorů.

To lze realizovat dvěma způsoby:

- 1) připojit napájení pomocí DC konektoru k Arduino
- 2) připojit napájení ke svorkovnici CNC Shieldu pomocí dvou vodičů

První případ je vhodný pro malé projekty, druhý pro energeticky náročnější projekty, kde je požadován větší výkon. Při volbě výkonu zdroje energie je nutno brát v úvahu, že jeho výkon musí být větší než celková spotřeba energie zařízení (požadovaný výkon všech součástí systému).

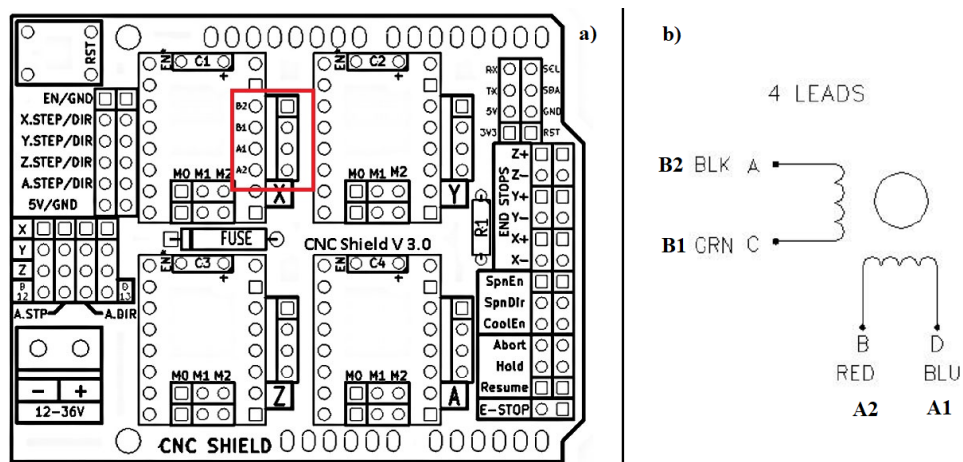
Pro napájení motorů byly vyzkoušené oba způsoby. Napájecím zdrojem byl adapter Sunny SYS1319-3012, který má na DC výstupu 12V a 2.5A. Výkon adapteru je 30W. První způsob připojení nedokázal dodat dostatečné napětí a proud na motory. Vzhledem k tomu byl zakoupen protikus pro DC konektor s výstupem ve výhledu dvou drátů. Na obrázku 35 pomocí červených obdélníků jsou vydělené oba konce protikusu a DC konektor. Černý drát jde do minusové svorky desky, červený do plusové. Toto zapojení už bylo funkční. Výkon zdroje byl dostatečný pro pohanění všech motorů najednou, ale bez jejich zatížení.



Obr. 35 Napájení desky 12V a 2,5A

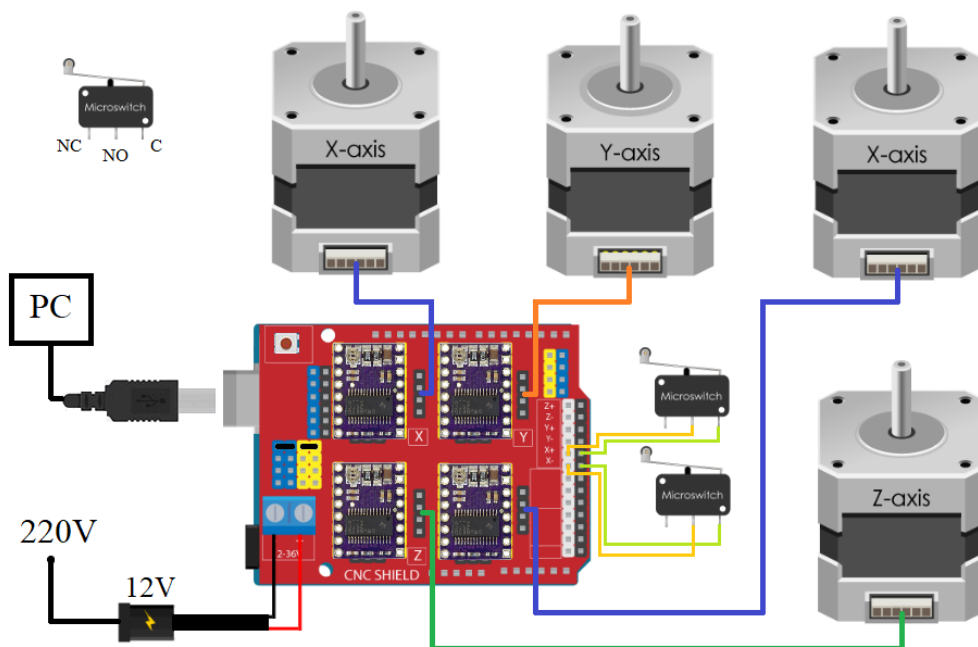
Připojení krokových motorů

Krokové motory jsou připojené k desce pomocí čtyř-pinových konektorů Dupont (otvory konektoru 2,54 mm). Pokud byly zakoupené motory bez takových konektorů, je nutno samostatně vložit dráty do jeho otvorů, přičemž sledovat shodu vodičů motoru a výstupy na desce Shieldu. V našem případě motory byly zakoupené bez takových konektoru. Na obrázku níže jsou vydělené piny na desce a odpovídající dráty motoru podle jeho datasheetu. Do konektoru Dupont shora dolů byly vloženy černý, zelený, modrý a červený dráty. Toto zapojení odpovídá kontaktům na desce a drivech.



Obr. 36 Kontakty pro připojení krokových motorů [20]

Byly vyzkoušené dva druhy driverů: Pololu A4988 a Drv8825. Při testech bylo zjištěno, že A4988 se hodně přehřívají a nedokážou ovládat systém v dlouhém časovém úseku. Drv8825 (které mohou pracovat s vyššími napětími a mají lepicí chladič, který odvádí ohřev do ovzduší) fungovaly bez žádných potíží a dokázaly otáčet motory v obou směrech a to i přes delší doby na základě vytvořeného algoritmu. Takže po testech bylo vyřešeno ponechat v každém slotu Drv8825. Schematické zapojení řídicího systému můžeme vidět níže.



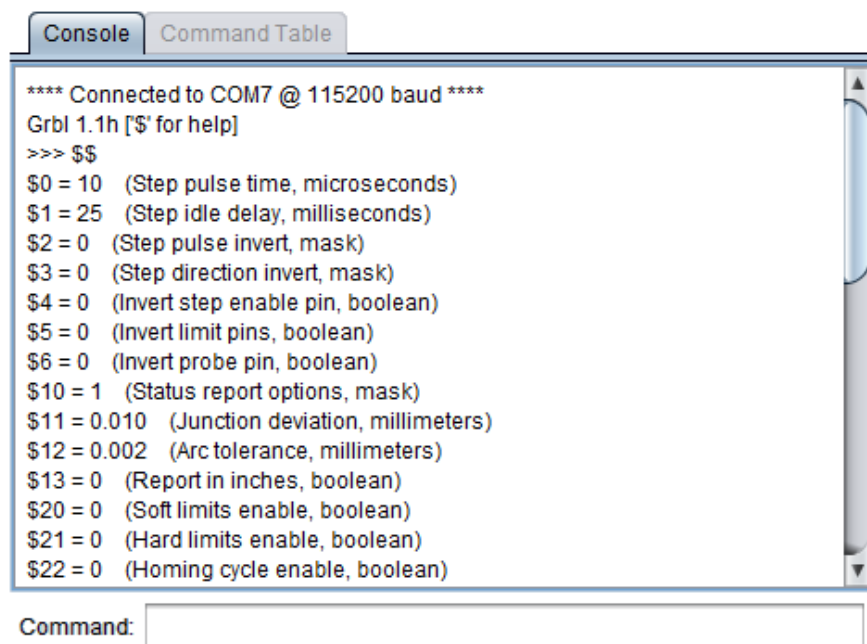
Obr. 37 Zapojení řídicího systému

Testování ovladačů pomocí počítače

Po připojení napájení a krokových motorů je nutné do ovladače doplnit firmware GRBL. To splníme pomocí programu “Arduino” a knihovny GRBL kódů. Program a knihovna jsou dostupné na internetu zdarma. Po jejich stažení musíme na začátku přidat knihovnu GRBL do seznamu knihoven programu Arduino a dále jít do záložky “Tools”. Tady zvolíme Arduino Uno a USB port počítače, ke kterému deska je připojená. Dále pomocí záložky “Sketch” nahrajeme GRBL na Arduino Uno. Po ukončení procesu program vypíše “Download completed”. Dále pomocí nástroje “Serial Monitor” nastavíme 115200 Baud. V této době už máme Arduino připravené.

Pro testování systému byl zvolen program “Universal G-code Sender”. Také je dostupný na internetu zdarma. Po stažení spustíme program a v oblasti “Connection” musíme zvolit USB port, ke kterému je připojeno Arduino Uno, v našem případě je to COM7, dále 115200 Baud (jako předtím) a Firmware GRBL. Zmačkneme tlačítko “Open”. V případě, že všechno je správně nastaveno a GRBL knihovna je uložena do Arduino program musí vypsát do oblasti “Console” hodně příkazů. Prvním musí být příkaz:

**** Connected to COM7 @ 115200 baud **** - je svědkem že komunikace nalezená.



Obr. 38 Rozhraní Universal G-code Sender

Také do konzole budou vypsány hlavní parametry firmwaru GRBL (\$0, \$1, \$2 atd.), které ovlivňují fungování našeho zařízení. Význam a konfigurace těchto parametrů budou probrané v následující kapitole.

9 Ovládání a monitorování systému

Jako ovládací a monitorovací firmware byl zvolen GRBL, který pomocí počítače zasílá na Arduino jednotlivé G příkazy a tím řídí systém. GRBL je vysoce výkonná a levná alternativa pro řízení pohybu pro různé CNC procesy. Daný firmware je zapsán v optimalizovaném jazyku C a využívá každé chytré funkce čipů kontroléru k dosažení přesného načasování a asynchronního provozu. Je schopen udržovat až 30 kHz stabilních regulačních impulsů bez chvění. Oblouky, kružnice a spirálový pohyb jsou plně podporované, stejně jako všechny ostatní primární příkazy G-kódu. Makro funkce, proměnné a většina opakovaných cyklů nejsou podporované, ale vhodné GUI aplikace dokážou udělat jejich převod do přímého G-kódu. GRBL zahrnuje kompletní řízení zrychlení s výhledem dopředu. To znamená, že ovladač prozkoumá až 16 pohybů do budoucnosti a naplňuje své rychlosti dopředu, aby zajistil plynulé zrychlení a odstranil trhnutí v zatáčkách.

9.1 GRBL firmware a G-kód

GRBL má velké množství příkazů a možností. V této kapitole budou probrány jenom ty, které byly vyzkoušené a použité pro ovládání US stolu. Prvním důležitým bodem jsou základní nastavení firmware. Pro jejich zobrazení zadáme příkaz `$$`. Do konzole v libovolné GUI budou vypsané všechny možné parametry. Pro změnu libovolného z nich použijeme jednoduchý příkaz:

`$X = Val`

Kde **`X`** – je číslo parametru, **`Val`** – hodnota, kterou chceme zadat.

Pro daný projekt důležité jsou nastavení:

`$0` – Step pulse time, microseconds

Krokové motory jsou dimenzovány na určitou minimální délku krokového impulsu. Tady musíme nastavit nejkratší impulsy, které krokové motory spolehlivě rozpoznají. Pokud jsou pulsy příliš dlouhé, můžeme narazit na potíže, když je systém provozován s velmi vysokou rychlostí posuvu a pulzů, protože se krokové impulzy se mohou navzájem překrývat. Je doporučeno něco kolem 10 mikrosekund, což je výchozí hodnota při prvním spouštění.

`$1` – Step idle delay, milliseconds

Pokaždé, když krokový motor dokončí pohyb a zastaví se, GRBL odloží jeho deaktivaci o tuto hodnotu. Nebo vždy můžeme mít osy napájeny tak, aby udržovaly polohu, nastavením této hodnoty na maximum 255 milisekund. V tomto případě motory budou vždy zapnuté.

\$20 – Soft limits enable, boolean

Měkké limity jsou bezpečnostní funkce, které pomáhají zabránit tomu, aby stroj cestoval za hranice os, havaroval nebo zlomil něco drahého. Funguje tak, že zná maximální limity pro každou osu a kde GRBL je v souřadnicích stroje. Kdykoli je do GRBL poslán nový pohyb G-kódu, zkontroluje, zda omylem nebyl překročen prostor stroje. Pokud tak učiníme, GRBL vydá okamžité zastavení, vypne stroj a nastaví systémový alarm označující problém. Pozice stroje bude zachována, protože to není způsobeno okamžitým nouzovým zastavením, jako jsou tvrdé limity.

Poznámka: měkké limity vyžadují povolení naváděcího cyklu a přesné nastavení maximálního posuvu os, protože GRBL potřebuje vědět, kde je. \$ 20 = 1/0 – pro aktivaci/deaktivaci.

\$21 - Hard limits enable, boolean

Pevné limity pracují v podstatě stejně jako měkké limity, ale místo toho používají fyzické spínače. V zásadě zapojíme některé spínače (mechanické, magnetické nebo optické) blízko konce dráhy každé osy. Když se spínač spustí, okamžitě zastaví veškerý pohyb, vypne stroj a přejde do poplašného režimu, který vyžaduje zkontrolovat stroj a resetovat vše. Je nutno pamatovat, že událost s pevným limitem je považována za kritickou událost, kdy krokové motory okamžitě budou zastavené a budou pravděpodobně mít ztracené kroky. GRBL nemá žádnou zpětnou vazbu na pozici, takže nemůže zaručit, že má tušení, kde je. Pokud jsou nastavené pevné limity, GRBL přejde do režimu ALARM s nekonečnou smyčkou, což dává šanci zkontrolovat stroj a resetovat systém. Je to čistě bezpečnostní funkce.

\$22 - Homing cycle enable, boolean

Naváděcí cyklus je používán k přesné lokalizaci známé a konzistentní polohy na stroji při každém spuštění GRBL mezi spouštěními. Jinými slovy, vždy přesně víme, kde se nacházíme. Například řekneme, že jsme začali něco opravovat a napájení zhaslo, znovu spustíme systém a GRBL nemá ponětí, kde je kvůli tomu, že krokové řízení je otevřenou smyčkou. Pokud máme navádění, máme vždy nulový referenční bod stroje, ze kterého lze vyhledat, takže vše, co musíme udělat, je spustit naváděcí cyklus a pokračovat tam, kde jsme skončili. Chceme-li nastavit naváděcí cyklus, musíme mít koncové spínače zajištěné v pevné poloze, aby nic neenarazilo nebo přesunulo, jinak bude referenční bod zmaten. Obvykle jsou nastaveny v nejvzdálenějším bodě v každé osy. Výhodou je, že můžeme použít koncové spínače pro pevné limity i navádění. Hrají se spolu dobře.

\$24 - Homing locate feed rate, mm/min

Cyklus navádění nejprve hledá limitní spínače s vyšší rychlostí vyhledávání a poté, když je najde, pohybuje se pomalejším posuvem domů do přesné nulové polohy stroje. Rychlost posuvu navádění je pomalejší, nastavíme ji na jakoukoli hodnotu, která poskytuje opakovatelné a přesné lokalizace nuly stroje.

\$25 – Homing search seek rate, mm/min

Rychlost vyhledávání je rychlost hledání naváděcího cyklu nebo rychlost, při které se snaží najít koncové spínače. Přizpůsobíme ji libovolné hodnotě tak, aby se stroj dostal ke koncovým spínačům v dostatečně krátké době, ale by je nenarazil příliš rychle.

\$27 – Homing switch pull-off distance, mm

Pro pěknou spolupraci s funkcí pevných limitů cyklus navádění se po svém vykonání odjede od všech koncových spínačů na tuto vzdálenost. Takže tato funkce pomáhá zabránit náhodnému spuštění pevného limitu po cyklu navádění. Hodnota musí být dostatečně velká, aby se vypnul koncový spínač. Pokud ne, GRBL vyvolá stav ALARM, protože sensor nebyl uvolněn.

\$100, \$101, \$102 – (X, Y, Z) – Travel resolution, steps/mm

Je to hodnota posuvného rozlišení - počet kroků motoru na 1mm posuvu dané osy. Tuto veličinu je potřeba spočítat a zapsat výše uvedeným příkazem. Nemusí být celá.

\$110, \$111, \$112 – (X, Y, Z) – Maximum rate, mm/min

Maximální rychlost každé osy. Jde experimentálně zjistit při testech na reálném modelu. Zkouška musí probíhat na celé délce osy.

\$120, \$121, \$122 – (X, Y, Z) – Acceleration, mm/sec²

Nastavení zrychlení každé osy. Hodnota také musí být zjištěna experimentálně na celé délce osy.

\$130, \$131, \$132 – (X, Y, Z) – Maximum travel, mm

Délka každé z os. Jsou určený pracovním prostorem modelu.

V současné době máme popsané všechna důležitá nastavení a teď zbývá uvést příkazy, kterými stroj bude řízen. Na základě těchto G-příkazů jde vytvořit kompletní pracovní algoritmus, zapsat ho do textového souboru a dále ten soubor nahrát na Arduino například pomocí GUI aplikace [21].

G00 – zrychlený pohyb. Daný příkaz je nezbytný k rychlému přesunutí efektoru do polohy obrábění nebo do bezpečné polohy. Zrychlený pohyb se nikdy nepoužívá k provádění obrábění, protože rychlost pohybu posuvné části stroje je velmi vysoká a variabilní.

G01 – lineární interpolace. Kód G01 poskytuje pohyb nástroje v přímce při dané rychlosti. Rychlost pohybu je označena F-adresou. Například příkaz G01 X100 F200 přemístí efektor na 100 milimetrů v ose X s rychlostí 200mm/min.

G04 – čekání. Kód G04 je příkazem k čekání na zadanou délku času. Tento nemodální kód je naprogramován pomocí adresy P, která udává počet sekund pauzy. Obvykle je tato doba od 0,001 do 99999,999 sekund. Pokud je příkaz G04 naprogramován bez časového faktoru, pak je systémem vnímán jako nemodální příkaz pro přesné zastavení.

G28 – automatický návrat do výchozí polohy stroje. To se týká zrychleného pohybu výkonných součástí do nulového bodu stroje. Návrat do výchozí polohy je primárně určen pro možnost kontroly velikosti a kvality obrobku uprostřed obráběcího programu. Někdy je kód G28 umístěn na konec řídicího programu, takže po jeho dokončení se pracovní plocha přesune do polohy vhodné pro vyjmutí obrobené součásti.

M08 – zapnutí svařovacího procesu. Původně v GRBL ten kód zapíná přívod chladicí kapaliny. To funguje tak, že na odpovídající pin CoolEN dodá logické napětí. Tento mechanismus můžeme využít pro zapnutí svařovacího agregátu.

M09 – vypnutí svařovacího přístroje. Na pinech CoolEn se objeví 0V.

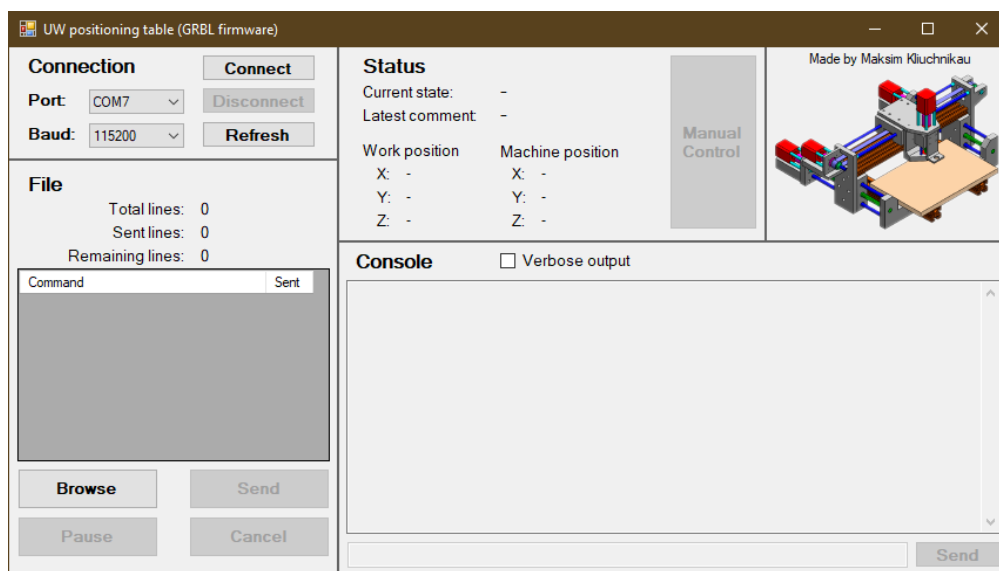
Jednoduchý algoritmus pro nájezd efektoru do zadané polohy, následující svařování a posle návrat do nulové pozice stroje by vypadal takhle:

G00 X100 Y100	<i>zrychlený nájezd do polohy 100mm v osách X a Y</i>
G01 Z25 F200	<i>lineární interpolace v ose Z na 25mm s rychlostí 200mm/min</i>
G01 Z35 F100	<i>lineární interpolace v ose Z na celou délku osy s rychlostí 100mm/min, aby nenarazil místo svaru moc rychle</i>
G04 P1	<i>čekání 1 sekundu</i>
M08 G04 P3 M09	<i>svařovací proces s délkou 3 sekundy</i>
G04 P1	<i>čekání 1 sekundu</i>
G01 Z0 F200	<i>návrat do nulové pozice v ose Z, bezpečné zvedání efektoru</i>
G28	<i>návrat do nulové pozice stroje</i>

Pomocí GRBL firmware jde jednoduše ovládat CNC procesy, ale pro zaslání příkazů a algoritmů potřebujeme odpovídající prostředí ve výhledu GUI aplikace.

9.2 GUI aplikace pro ovládání stolu

Pro monitorování procesu a ovládání laboratorního modelu stolu byla vytvořena jednoúčelová GUI aplikace v prostředí Visual Studio pomocí programovacího jazyku C#. Prvním krokem při tvorbě aplikace bylo přidání statických a interaktivních elementů do předem připraveného okna. Visual Studio je velkou výhodou při tvorbě GUI, protože obsahuje knihovnu připravených elementů. Jednoduše přetáhneme cokoliv z knihovny do vizualizačního panelu a jeho kódový popis se zobrazí ve zdrojovém kódu, kde budeme moci ho dále upravovat podle potřeby. Následujícím krokem bylo provázání elementů a procesů, probíhajících v aplikaci, s portem a GRBL firmware. Aplikace může být inicializovaná jenom v případě připojení Arduino Uno k počítači. To znamená, že po otevření exe-souboru okno se zobrazí, ale nebudeme moci ho zaktivovat. Daná aplikace obsahuje dva okna. Vzhled hlavního je představen na dalším obrázku.



Obr. 39 Grafické rozhraní pro ovládání stolu

Rozhraní obsahuje několik oblastí. Každá z nich má svůj účel. Oblast “Connection” odpovídá za výběr portu a nalezení komunikace s Arduino. Obsahuje tlačítka, která jsou aktivní tehdy, když jsou splněné určité podmínky, pro každé tlačítko svoje.

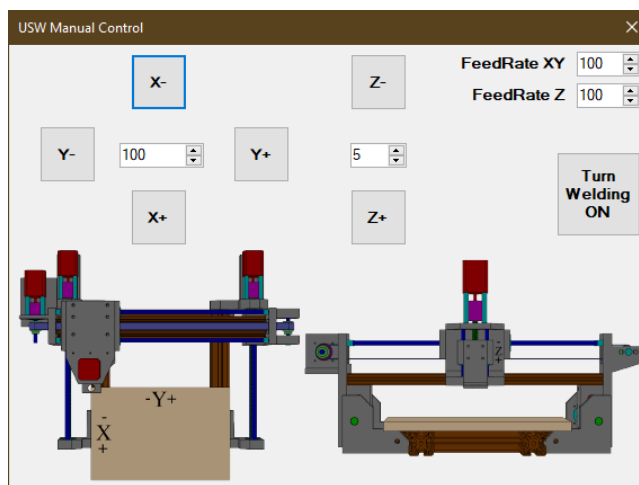
Oblast “File” umožňuje načíst z textového souboru dříve vytvořený G-kód, který se zobrazí ve výhledu tabulky. Máme tady tlačítka pro nahrání souboru a jeho následovné zaslání do Arduino. Také máme tlačítka pro zastavení/pokračování a zrušení daného procesu.

Oblast konzole nám ukazuje, jaké příkazy byly zpracovány systémem, co se děje s GRBL (když zapneme “Verbose output”) a dodává možnost ovládání pomocí jednotlivých G-příkazů. Konzole

je významná tím, že je to oblast, pomocí které provádíme kalibraci modelu a jakoukoliv změnu v základních nastaveních GRBL.

Poslední oblast “Status” monitoruje stav systému a ukazuje, kde se nachází koncový bod efektoru a na jakou vzdálenost se pohnuly osy v současné době. “Work position” je pozice efektoru, “Machine position” – posunutí v jednotlivých osách. Rozdíl mezi těmito parametry nastává v době, když pomocí offsetu upřesníme reálnou polohu efektoru. To znamená, že efektor může být umístěn mimo centrální osu držáku: na jeho boku, pootočen atd. Při procesu ultrazvukového svařování efektor bude se nacházet v pouzdře a jeho koncový bod bude ležet níže otvoru na přesně stanovené vzdálenosti. Tím pádem potřebujeme nastavit offset jenom v ose Z.

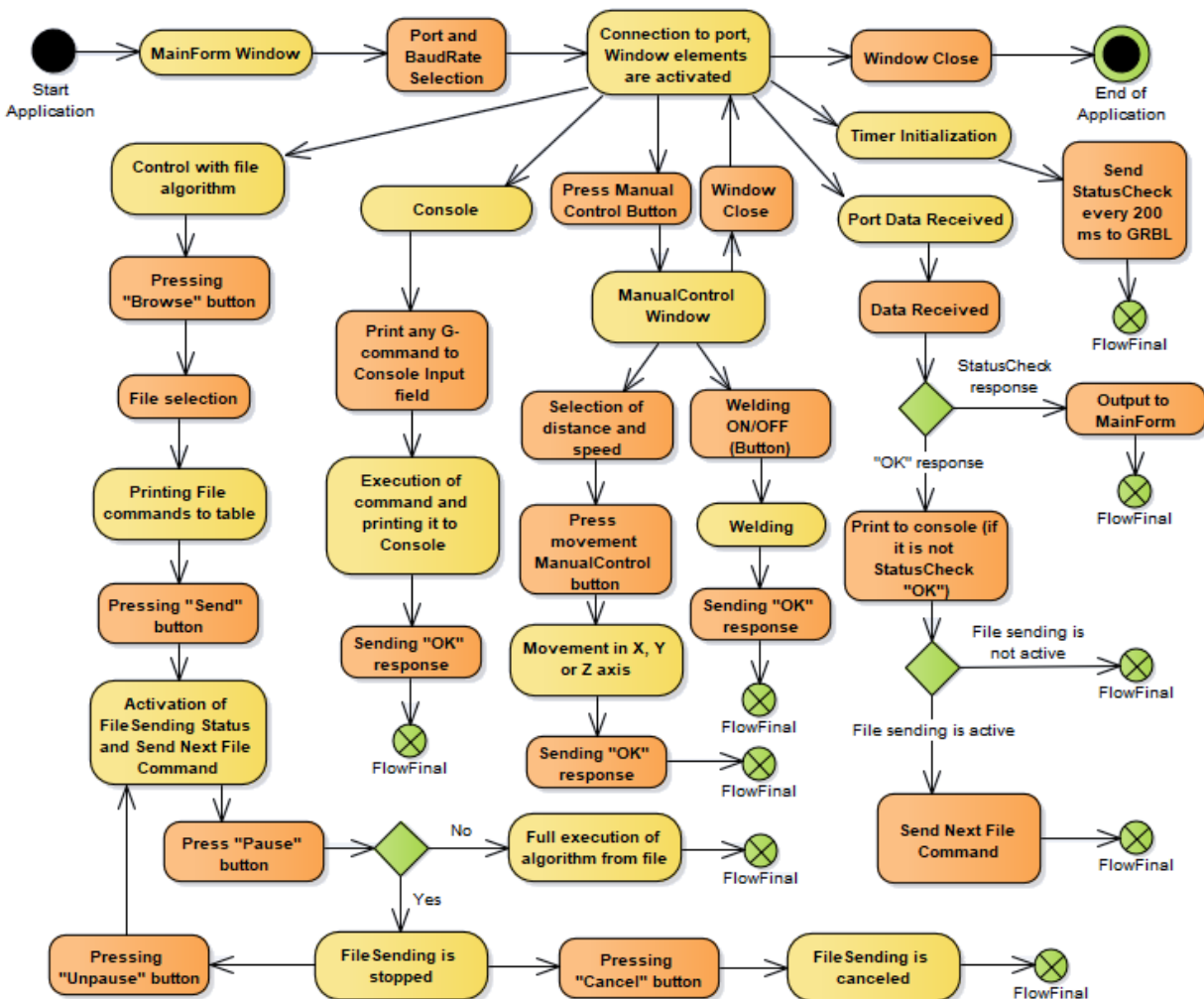
V oblasti “Status” je tlačítko “Manual control”. Po jeho zmačknutí se objeví další okno, které zablokuje klávesy v předchozím okně, ale budeme moct monitorovat systém. Dané okno je určeno jenom pro ovládání procesu UZ svařování. Tady můžeme posouvat stroj pomocí tlačítek na předem zvolené vzdálenosti s vybranou rychlostí. Dané okno na rozdíl od hlavního funguje v relativních souřadnicích (hlavní pracuje v absolutních). To znamená, že libovolný příkaz o posunutí, zaslaný pomocí tlačítek daného okna, bude zabalen programem do speciální formy. *Relativní souřadnice* znamenají, že stroj se posune *o takovou délku*, kterou nastavíme. *Absolutní* znamenají, že přemístíme stroj *na požadovanou vzdálenost*.



Obr. 40 Okno pro manuální ovládání stolu

Také máme tlačítko pro zapnutí/vypnutí svařovacího agregátu. Dana klávesa posílá příkazy M08 a M09. První příkaz dodá logické napětí na piny CoolEn, druhý nastaví to napětí na 0V. Tento mechanismus může být použit pro aktivaci/deaktivaci diody pro ukázkou svařování u laboratorního modelu.

Pro lepší představení toho, jak aplikace funguje, byl vytvořen vývojový diagram (viz obr. 41). Diagram ukazuje instance a aktivity (jsou žluté), probíhající v aplikaci, a akce (oranžové), pro spouštění těchto aktivit.



Obr. 41 Vývojový diagram aplikace

Při popisu aplikace je nutno uvést, že při její aktivaci do GRBL bude zaslán StatusCheck každé 200 ms (nastaveno časovačem). V případě, že budeme chtít vidět odpovědi GRBL na každý tento dotaz, jednoduše zapneme “Verbose output”, což začne vypisovat je do konzole. Tyto odpovědi jsou moc důležité pro aplikaci vzhledem k tomu, že na jejich základě program monitoruje polohu stroje.

Zdrojový kód aplikace a její zkompileovaný soubor budou uloženy v příloze k práci spolu s 3D modely stolu a každé jeho navržené součástky.

9.3 Kalibrace modelu

Celkový model už je připraven včetně jeho SW částí a jediné, co zbývá, je kalibrace. To znamená, že musíme správně nastavit výchozí parametry GRBL a potom při fyzických testech zdokonalit ty parametry tak, aby model pracoval plynule bez poruchových stavů a pohyblivá část nenarážela například koncové spínače s velkou rychlostí. Kalibrace se provádí pro zlepšení přesnosti a životností stroje.

Prvním důležitým bodem je spočítat rozlišení každé z os. V osách X a Z máme převody pomocí trapézových šroubů a matic, v ose Y máme řemenový převod. Pro každý druh převodu použijeme odpovídající vzorec.

Ve výchozím nastavení GRBL musíme zadat parametry \$100, \$101 a \$102 – *Travel resolution* pro každou osu v krocích/mm nebo jinými slovy, kolik kroků musí motor provést, aby dosáhl posunutí zátěže o 1 mm (toto číslo nemusí být celé). Pokud dáme stroji příkaz, aby se pohyboval o 100 mm ve směru, který potřebujeme, chceme pohyb přesně o 100 mm.

Pro osy X a Z vzorec pro výpočet je poměrně jednoduchý:

$$T_p = \frac{S_{km} * F_{km}}{P_{\xi}} \quad (27)$$

kde T_p – přesnost pohybu, krok/mm,

S_{km} – počet kroků za otáčku motoru (zakoupené mají 200),

F_{km} – nastavené mikrokrokování (1, 2, 4, 8 atd.),

P_{ξ} – rozteč šroubů (např. 2 mm).

Takže pro osu X: $\$100 = T_{pX} = \frac{200*1}{3} = 66,667 \text{ kroků/mm}$

Přesnost polohování v ose X je 0,015 mm/krok.

Pro osu Z: $\$102 = T_{pZ} = \frac{200*1}{2} = 100 \text{ kroků/mm}$

Přesnost polohování v ose Z je 0,01 mm/krok.

V ose Y máme řemenový převod a vzorec je:

$$T_p = \frac{S_{km} * F_{km}}{P_{\check{r}} * N_{\check{r}m}} \quad (28)$$

kde $P_{\check{r}}$ – rozteč mezi zuby řemene,

$N_{\check{r}m}$ – počet zubů na řemenici.

Pro osu Y máme: $\$101 = T_{pY} = \frac{200 \cdot 8}{5 \cdot 15} = 21,333 \text{ kroků/mm}$

Přesnost polohování v ose X je 0,046875 mm/krok.

Dalším bodem je nastavit maximální možnost rychlost, zrychlení a délku každé osy.

Délky os jsou určený pracovním prostorem modelu a jsou 200, 300 a 35mm pro osy X, Y a Z úměrně. $\$130 = 200$; $\$131 = 300$; $\$132 = 35$

Rychlosti a zrychlení v osách byly nastavené na základě hrubých výpočtů a pomoci experimentálních zkoušek můžou být zdokonalené:

$\$110 = 720 \text{ mm/min}$

$\$111 = 2250 \text{ mm/min}$

$\$112 = 240 \text{ mm/min}$

$\$120 = \$121 = 10 \text{ mm/sec}^2$

$\$122 = 5 \text{ mm/sec}^2$

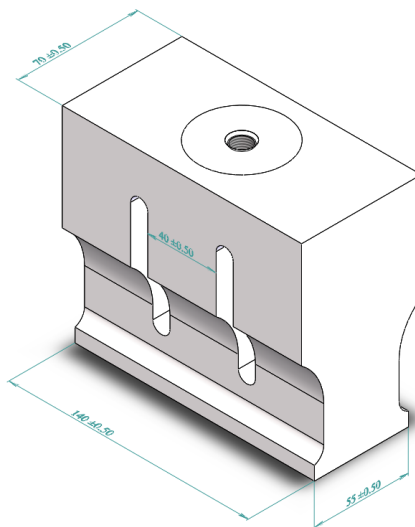
Pokud chceme potvrdit správnost kalibrace nebo ji zpřesnit, musíme provést jednoduchý, ale efektivní postup: požádat stroj, aby se pohnul na určitou délku (ne příliš krátkou). Změříme ujetou vzdálenost a porovnáme ji s odhadovanou vzdáleností. Pokud jsou identické, vše je v pořádku, pokud ne, upravíme parametry *Travel resolution* s zaúčtováním chyby. Nová hodnota se vypočítá pomoci proporcionálního poměru. Pro dosažení požadované přesnosti nájezdu je doporučeno tento proces provést minimálně dvakrát.

Kromě nastavení základních parametrů GRBL také byly vyzkoušené koncové limity pro osu X. Byly zakoupené mechanické mikropínače ZIPPY SM-05S-05P0-Z [22]. Pomoci dvou vodičů oba spínače byly připojené k odpovídajícím pinům CNC Shieldu. Byly použité kontakty NO a C každého senzoru a kontakt NC byl ponechán volně. Dále bylo nutno nastavit parametr $\$21 = 1$ pro aktivaci funkce ve firmware. Spínače fungují jako tlačítka nouzového zastavení a to v případě, že budou zmačknuté, když to nebylo očekáváno. Aktivace spínače okamžitě zastaví stroj, vypíše poruchový stav ALARM do konzole a bude vyžadován restart systému.

V případě aktivace funkcí *Homing cycle* a *Soft limits enable* (potřebují zajištění senzorů na modelu v přesných polohách na každé ose) dane spínače budou pracovat pro všechny funkce najednou a při zmačknutí například v průběhu naváděcího cyklu nezpůsobí žádný ALARM.

10 Návrh sonotrody pro US

Tento kapitola popisuje postup návrhu sonotrody pro ultrazvukové svařování. V rámci stáže v ruské firmě VESSAR byl namodelován sonotrod pro US částí světlometu nákladního auta. Na jeho příklade bude vysvětlen postup testování různých variací stejného modelu pro docílení nejlepších parametrů svařovacího procesu tímto prvkem. Testování se dělá už v dříve popsaném prostředí SOLIDWORKS, což umožňuje vytvořit finální verzi modelu virtuálně. Vývoj vlnovodů a počítačová simulace jejich chování při svařování zaručuje kvalitní výkon celého ultrazvukového systému. Toto se projeví vysokou účinností a v důsledku toho i zvýšenou životností zařízení.



Obr. 42 Model sonotrodu pro US světlometu

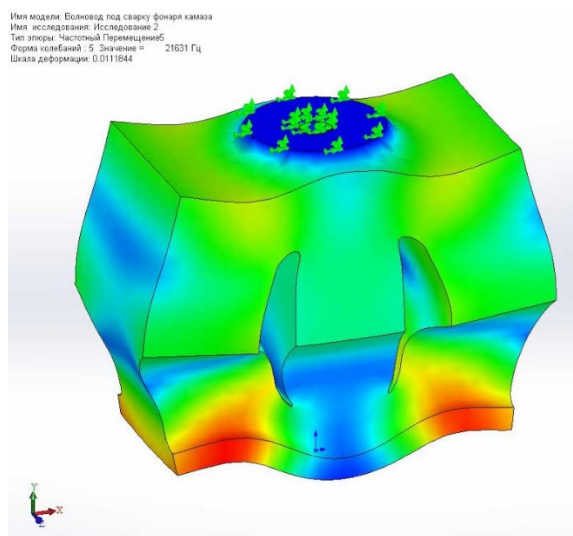
Na začátku je nutno uvést dva základních omezení, popisujících proces:

1. Materiály, ze kterých budou vyrobeny vlnovody, nejčastěji jsou hliník nebo titan. Ještě může být použita ocel. Jenže ocel se používá zřídka kdy, zejména v procesech pro současné svařování a řezání.
2. U každého druhu sonotrody jsou předepsané parametry, které nelze měnit při simulaci. Například u výše uvedeného sonotrody je to šířka, která je 140 mm. Takový druh sonotrody může mít šířku: 90, 120, 140, 160, 180, 200, 240 mm. To závisí na oblasti svaru.

Před začátkem simulace musíme připravit několik různých verzí prvku. Můžeme měnit jeho materiál, délku, šířku a délku drážek. Důležitým bodem je to, že drážky by měly být rovnoměrně rozmístěné po celé šířce vlnovodu. Jakmile budeme mít několik variant, které chceme vyzkoušet, otevřeme nástroj SOLIDWORKS Simulation a začneme je testovat. Zkoušky modelů daného prvku byly provedeny v ruské licenční verzi programu od roku 2013.

Postup práce v SOLIDWORKS Simulation je jednoduchý:

1. Vybereme “Nová analýza”.
2. Zvolíme druh analýzy - frekvenční.
3. Dále máme zvolit “pevnou” hranu. To znamená takovou, od které se vlna bude šířit dále. V našem případě je to horní hrana, na které je umístěn otvor se šroubovým závitem.
4. Dále ve vlastnostech analýzy nastavíme nutné údaje, jako jsou například frekvence (20000Hz), počet frekvencí atd.
5. Spustíme start analýzy.
6. Dostaneme výsledky (viz obr. 43).
7. Dále musíme provést daný postup s každou variantou modelu.



Obr. 43 Výsledky frekvenční analýzy

Výsledky ukazují šíření frekvenčních amplitud v materiálu v závislosti na formě, a jak model může být deformován. Oblastí největšího namáhání jsou vydělené červenou barvou. Při testování cílem je vytvořit takový model, kde červenou bude jenom spodní hrana (svařovací plocha). Přičemž musí být červená rovnoměrná, jinak takový model není funkční a může způsobit nedostatečné nebo naopak nadměrné svařování v odpovídajících zónách plochy. V případě, že na spodní hraně budou další barvy, je nutno změnit nějaké z parametrů modelu a znovu ho otestovat. Takový postup musíme zopakovat tolikrát, pokud nedostaneme uspokojivé výsledky. Je to experimentální postup, ale výhodou je, že nevyžaduje žádné zdroje kromě času. Pomocí dané metody už bylo namodelováno hodně druhů sonotrod, které našly uplatnění v různorodých spotřebitelských oblastech.

11 Závěr

Cílem této práce je rozbor procesu navrhování polohovacího systému pro ultrazvukové svařování metalické a plastové částí automobilových dveří. Jelikož daný proces zahrnuje v sobě velké množství otázek na řešení, práce se zabývá problematikou různých technických odvětví: strojírenství, virtuální modelování 3D objektů, reálná skladba navrženého zařízení, elektronika, programování a návrh SW.

Teoretická část práce je rozbohem technologie ultrazvukového svařování, prostředí programu SOLIDWORKS, který byl velkým přínosem při návrhu stroje, a technických prostředků pro řízení a ovládání systémů.

Na začátku pomoci vystudovaného CAD programu SOLIDWORKS byl vytvořen koncepční model průmyslového stroje, a poté jeho podobný zmenšený laboratorní model. Větší virtuální model slouží pro ukázkou reálného stroje, laboratorní – pro skladbu podobného zařízení a vyzkoušení na něm řídicích algoritmů.

Laboratorní model byl vytvořen včetně materiálu součástí, byly spočítané hmotnosti jednotlivých komponent a dále provedené pevnostní analýzy nejvíce namáhaných míst a také výpočet potřebného momentu krokových motorů pro pohnutí systému. Pro základní podstavec byly použité strojní profily, další komponenty byly tištěné na 3D tiskárně (aby pohyblivá část zařízení byla lehká), menší součástky (jako jsou ložiska, matice, šrouby atd.) a řídicí moduly modelu byly zakoupené. Cílem bylo vytvořit rozebíratelný model, takže všude byly použité šroubové spoje pro lehkou demontáž v případě výměny nějaké poškozené součástky. Při skladbě se objevilo, že většina součástí po 3D tisku vyžaduje drobné úpravy. Mezi tyto úpravy patřilo broušení některých hran, zvětšování průchozích děr vrtákem, aby se umožnilo volné vkládání šroubu, postupné vrtání závitů odpovídajících velikostí atd. Výsledkem je reálné funkční polohovací zařízení (foto je umístěno v odpovídající kapitole).

Pohonná a řídicí část se skládá z čtyř krokových motorů, čtyř driverů (ve výhledu čipu, jeden driver pro jeden motor), Arduino Uno a CNC Shieldu (propojuje Arduino a drivery). Komunikace mezi součástkami je umožněna pomocí sendvičového zapojení, drátů a pinových konektorů. Propojení počítače a Arduino funguje přes USB port. Na Arduino bylo nahráno GRBL firmware přímo z počítače pomocí univerzálního prostředí od stejného výrobce. Pomocí GRBL jde kontrolovat a ovládat různorodé CNC procesy a US není výjimkou.

Dále byl vytvořen jednoduchý GUI program pro ovládání stolu. Program dovoluje monitorovat stav v každé ose a ovládat systém manuálně pomocí jednotlivých G příkazů nebo souboru s připraveným algoritmem. Algoritmus (posloupnost G příkazů) může být vytvořen v Notepadu a potom pomocí tlačítek “Browse” a “Send” zaslán s počítače do systému.

Po montáži mechanické částí do modelu byly nainstalované krokové motory a provedena kalibrace rychlostí, zrychlení a dalších důležitých parametrů, na základě kterých funguje GRBL. Také byly otestované mechanické koncové mikropsínače. Tyto senzory spolupracují s GRBL a jsou propojené s CNC Shieldem. Mají dvě funkce: slouží jako referenční body každé osy a vypínají systém v případě zmačknutí, když není očekávaná jejich aktivace.

Poslední kapitola popisuje postup při virtuálním návrhu efektorů pro ultrazvukové svařování. Postup je popsán na základě dříve vytvořeného sonotrodu pro ultrazvukové svařování součástek světlometu nákladního auta.

Jako další směr řešení projektu vidím instalaci optických koncových spínačů, dodání tlačítka nouzového vypínání a naladění jejich spolupráce s GRBL. Také existuje možnost rozšíření navrženého GUI o vizualizační monitor pro lepší a lehčí ovládání.

PODĚKOVÁNÍ

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu SP2020/57 Výzkum a vývoj pokročilých metod v oblasti řízení strojů a procesů financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

12 Seznam použité literatury

- [1] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1860-3.
- [2] *Ultrasonic transducers technical notes* [online]. North America: Olympus NDT, 2006. Dostupné z: <https://mbi-ctac.sites.medinfo.ufl.edu/files/2017/02/ultrasound-basics.pdf>
- [3] ROSE, Joseph L. *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. ISBN 0-521-54889-6.
- [4] KRAUTKREMER, J. a KRAUTKREMER, G. *Directory. Ultrasonic control of materials*. Moscow: Metallurgy, 1991. ISBN: 5-229-00362-6
- [5] GOLYAMINA I. P. *Ultrasound*. Moscow: publisher "Soviet Encyclopedia", 1979. ISBN: 978-5-458-42744-9
- [6] BALDEV Radj, V. RADJENDRAN, P. PALANICHAMI. *The world of physics and technology. Ultrasound Applications*. Moscow: Technosphere, 2006. ISBN: 5-94836-088-1
- [7] REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-466-8.
- [8] *INTRODUCING SOLIDWORKS* [online]. 175 Wyman Street, Waltham, USA: Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 2015 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_EN.pdf
- [9] HOLZER, Jan, Blanka JAGOŠOVÁ a Jaroslav KOLÁŘ. *Učební text SOLIDWORKS*. SOŠ a SOU Vyškov: StrojTech, 2015.
- [10] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0020-2.
- [11] JANEČEK, Jan. *Distribuované systémy*. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-010-0913-0.
- [12] VLACH, Jaroslav. *Řízení a vizualizace technologických procesů*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-860-5666-X.
- [13] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [14] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.

- [15] *Klon Arduino UNO R3, USB B, Atmega16u2* [online]. [cit. 2020-03-10] Dostupné z: <https://www.gme.cz/100-kompatibilni-klon-arduino-uno-r3-usb-b-atmega16u2>
- [16] *Shield pro Arduino UNO* [online]. [cit. 2020-03-10] Dostupné z: <https://www.gme.cz/shield-pro-arduino-uno-4x-shield-budice-krokovych-motoru>
- [17] *Driver pro krokové motory A4988* [online]. [cit. 2020-03-10] Dostupné z: <https://www.postavrobota.cz/Driver-pro-krokovye-motory-A4988-d92.htm>
- [18] *Driver pro krokové motory Drv8825* [online]. [cit. 2020-03-10] Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2133>
- [19] *Napájecí zdroj Sunny SYS1319-3012-T2* [online]. [cit. 2020-03-10] Dostupné z: <https://www.sunny-euro.com/cs/produkty/sys1319-3012-t2-2-1x5-5x11-s-rc-1-8m-6ft>
- [20] *Krokový motor Nema 17 (JK42HS40-1704)* [online]. [cit. 2020-03-10] Dostupné z: <https://www.gme.cz/krokovy-motor-nema-17>
- [21] *GRBL firmware* [online]. GitHub, 2020 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://github.com/gnea/grbl>
- [22] *Mikrospínač SM-05S-05P0-Z* [online]. [cit. 2020-05-04] Dostupné z: <https://www.gme.cz/mikrospinac-zippy-sm-05s-05p0-z>
- [23] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Praha: vydavatelství BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0141-1.
- [24] SCHMID, Dietmar. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. Praha: Europa - Sobotáles, 2005. ISBN 80-867-0610-9.
- [25] XIAO, Perry. *Designing embedded systems and the internet of things (IoT) with the ARM Mbed*. Hoboken: Wiley, 2018. ISBN 978-111-9364-016.